

Aus dem medizinischen Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde  
des Fachbereichs Medizin der Philipps-Universität Marburg  
Geschäftsführender Direktor: Prof. Dr. Roland Frankenberger  
Abteilung für Orofaziale Prothetik und Funktionslehre  
Direktor: Prof. Dr. Ulrich Lotzmann

**Zum Einfluss unterschiedlicher Volumina gleichen Kaugutes  
auf das Kaumuster vollbezahnter junger Erwachsener**

Inaugural-Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades der Zahnmedizin

dem Fachbereich Medizin der Philipps-Universität Marburg  
vorgelegt von

Lena Rennebeck  
aus Cuxhaven

Marburg, 2016

Angenommen vom Fachbereich Medizin  
der Philipps-Universität Marburg am: 3. Februar 2016

Gedruckt mit Genehmigung des Fachbereichs.

Dekan: Herr Prof. Dr. H. Schäfer  
Referent: Herr Prof. Dr. U. Lotzmann  
Korreferent: Herr PD Dr. P. Rehmann

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	V
1 Einleitung und Problemstellung.....	1
2 Grundlagen.....	4
2.1 Aufgaben und Strukturen des Kausystems.....	4
2.2 Prinzipien der neuromuskulären Steuerung der Unterkieferbewegungen.....	7
2.3 Die Unterkieferbewegungen beim Kauen.....	9
2.4 Einflüsse auf das Kaumuster.....	12
2.5 Anforderungen an ein Kaugut bei der Durchführung von Studien.....	15
2.6 Registrierung von Kaubewegungen.....	16
3 Material und Methode.....	21
3.1 Der Kinesiograph des Registriersystems K7.....	21
3.2 Wahl des Kaugutes.....	27
3.3 Ethikvotum und Probandenkollektiv.....	28
3.4 Versuchsablauf.....	29
3.5 Statistische Aufbereitung der Messdaten.....	32
4 Ergebnisse.....	34
4.1 Probandenkollektiv.....	34
4.2 Anzahl der Kauzyklen bei unterschiedlichen Kaugutmengen.....	35
4.3 Maximale Mundöffnung bei unterschiedlichen Kaugutmengen.....	40
4.4 Unterkieferbewegungen in der Transversalen bei unterschiedlichen Kaugutmengen.....	42
4.5 Unterkieferbewegungen in der Sagittalebene bei unterschiedlichen Kaugutmengen.....	45

4.6	Geschwindigkeit und Dauer der Unterkieferbewegungen .....	48
4.6.1	Maximale und durchschnittliche Geschwindigkeit der Öffnungs- und Schießbewegungen des Unterkiefers bei unterschiedlichen Kaugutmengen .....	48
4.6.2	Dauer von Kauzyklus und Kausequenz bei unterschiedlichen Kaugutmengen .....	51
4.7	Richtungsverlauf der Kauzyklen und Kauseitenpräferenz .....	54
4.8	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	56
5	Diskussion .....	58
5.1	Probandenkollektiv .....	58
5.2	Abhängigkeit der Anzahl der Kauzyklen von der Kaugutmenge .....	58
5.3	Abhängigkeit der maximalen Mundöffnung von der Kaugutmenge .....	64
5.4	Abhängigkeit der Bewegungen in transversaler Richtung von der Kaugutmenge .....	66
5.5	Abhängigkeit der Bewegungen in sagittaler Richtung von der Kaugutmenge .....	68
5.6	Abhängigkeit der Geschwindigkeit und der Dauer der Kaubewegungen von der Kaugutmenge .....	69
5.6.1	Abhängigkeit der Geschwindigkeit sowie Dauer eines Kauzyklus von der Kaugutmenge .....	69
5.6.2	Abhängigkeit der Dauer einer Kausequenz von der Kaugutmenge .....	72
5.7	Richtungsverlauf des Kauzyklus und dessen Abhängigkeit von der Kaugutmenge .....	73
5.8	Kritische Betrachtung zur Methode und Ausblick .....	77
6	Zusammenfassung .....	83
6.1	Summary .....	86
7	Literatur .....	89
	Anhang .....	

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Zeitlich aufgeschlüsselte Darstellung der Literatur zum Begriff „Kaumuster“ im Zeitraum von 1965-06/2014 .....	2
Abb. 2:	Schematische Darstellung der zentralen und peripheren neuromuskulären Steuerung .....	7
Abb. 3:	Kauzyklus in sagittaler und frontaler Ansicht.....	9
Abb. 4:	Kausequenz in sagittaler und frontaler Ansicht, grafisch dargestellt .....	10
Abb. 5:	Beispiele für elektronische Systeme zur Erfassung von Unterkieferbewegungen.....	18
Abb. 6:	An den Unterkieferfrontzähnen befestigter Registriermagnet .....	21
Abb. 7:	Registrierbogen .....	22
Abb. 8:	Einzelner Kauzyklus mit stilisiert dargestellten Frontzähnen.....	24
Abb. 9:	Darstellung einer gesamten Kausequenz mit einer Vielzahl von Kauzyklen von der Aufnahme des Speisebolus bis zum Schlucken.....	25
Abb. 10:	Darstellung einer gesamten Kausequenz über die Funktion der Zeit .....	25
Abb. 11:	Karottenstücke definierten Gewichts: 2 g, 4 g, 8 g.....	27
Abb. 12:	Ablaufschema.....	30
Abb. 13:	Zunahme der Kauzyklen bei steigender Kaugutmenge und Abnahme der Kauzyklen pro ein Gramm Kaugut bei steigender Kaugutmenge .....	36
Abb. 14:	Kaumuster zweier Probanden bei drei Durchgängen mit je 8 g Kaugutmenge.....	37
Abb. 15:	Kaumuster zweier Probanden bei Kaugutmengen von 2 g, 4 g und 8 g.....	38
Abb. 16:	Kaumuster zweier Probanden bei Kaugutmengen von 2 g, 4 g und 8 g.....	39
Abb. 17:	Kaumuster zweier Probanden bei Kaugutmengen von 2 g, 4 g und 8 g.....	40
Abb. 18:	Maximale Mundöffnung in Millimeter in Abhängigkeit von der Kaugutmenge .....	41
Abb. 19:	Abweichungen von der Mittellinie nach rechts und links bei unterschiedlichen Kaugutmengen .....	44
Abb. 20:	Maximales Bewegungsausmaß nach anterior in Millimeter in Abhängigkeit von der Kaugutmenge.....	46

Abb. 21: Maximales Bewegungsausmaß nach posterior in Millimeter in Abhängigkeit von der Kaugutmenge.....	47
Abb. 22: Maximale Geschwindigkeit der Öffnungsbewegung in Millimeter pro Sekunde in Abhängigkeit von der Kaugutmenge .....	48
Abb. 23: Durchschnittliche Geschwindigkeit der Öffnungsbewegung in Millimeter pro Sekunde in Abhängigkeit von der Kaugutmenge .....	49
Abb. 24: Maximale Geschwindigkeit der Schließbewegung in Millimeter pro Sekunde in Abhängigkeit von der Kaugutmenge .....	50
Abb. 25: Durchschnittliche Geschwindigkeit der Schließbewegung in Millimeter pro Sekunde in Abhängigkeit von der Kaugutmenge .....	51
Abb. 26: Dauer der Öffnungsbewegung in Sekunden in Abhängigkeit von der Kaugutmenge in Gramm .....	52
Abb. 27: Dauer der Schließbewegung in Sekunden in Abhängigkeit von der Kaugutmenge in Gramm .....	53
Abb. 28: Zunahme der Kauzyklen bei steigender Kaugutmenge und Abnahme der Kauzyklen pro ein Gramm Kaugut bei steigender Kaugutmenge .....	59
Abb. 29: Kauzyklus in frontaler Betrachtung .....	73

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Beispiele für gelenknah und gelenkfern aufzeichnende elektronische Registriersysteme .....	17
Tab. 2:	Als primäre Zielgrößen der Untersuchung definierte Messgrößen .....	32
Tab. 3:	Tabellarische Darstellung der als sekundäre Zielgrößen der Untersuchung definierten Messgrößen mit Skalenniveau und Einheit .....	32
Tab. 4:	Anzahl der Kauzyklen bei Kaugutmenge bei 2 g, 4 g und 8 g .....	35
Tab. 5:	Verhältnisse zwischen der Anzahl von Kauzyklen bei unterschiedlichen Kaugutmengen .....	35
Tab. 6:	Maximale Mundöffnung bei unterschiedlichen Kaugutmengen .....	41
Tab. 7:	p-Werte für Unterschiede zwischen den drei Kaugutmengen im lateralen Bewegungsausmaß .....	42
Tab. 8:	Abweichungen von der Mittellinie nach rechts während der Öffnungs- bewegung bei unterschiedlichen Kaugutmengen .....	43
Tab. 9:	Abweichungen von der Mittellinie nach links während der Öffnungs- bewegung bei unterschiedlichen Kaugutmengen .....	43
Tab. 10:	Abweichungen von der Mittellinie nach rechts während der Schließ- bewegung bei unterschiedlichen Kaugutmengen .....	43
Tab. 11:	Abweichungen von der Mittellinie nach links während der Schließ- bewegung bei unterschiedlichen Kaugutmengen .....	43
Tab. 12:	Seite des größeren lateralen Bewegungsausmaßes während der Schließ- bewegung .....	45
Tab. 13:	p-Werte für Unterschiede zwischen den drei Kaugutmengen im sagittalen Bewegungsausmaß .....	45
Tab. 14:	Bewegungen nach anterior bei unterschiedlichen Kaugutmengen .....	46
Tab. 15:	Bewegungen nach posterior bei unterschiedlichen Kaugutmengen .....	47
Tab. 16:	Maximale Geschwindigkeit der Öffnungsbewegung bei unterschiedlichen Kaugutmengen .....	48
Tab. 17:	Durchschnittliche Geschwindigkeit der Öffnungsbewegung bei unter- schiedlichen Kaugutmengen .....	49
Tab. 18:	Maximale Geschwindigkeit der Schließbewegung bei unterschiedlichen Kaugutmengen .....	50

Tab. 19: Durchschnittliche Geschwindigkeit der Schließbewegung bei unterschiedlichen Kaugutmengen .....	51
Tab. 20: Dauer der Öffnungsbewegung bei unterschiedlichen Kaugutmengen .....	52
Tab. 21: Dauer der Schließbewegung bei unterschiedlichen Kaugutmengen.....	52
Tab. 22: Zusammenfassung.....	53
Tab. 23: Bewegungsrichtung des Unterkiefers beim Kauen unterschiedlicher Kaugutmengen .....	54
Tab. 24: Startrichtung beim Kauen der Kaugutmenge 2 g (1.-3. Durchgang).....	55
Tab. 25: Startrichtung beim Kauen der Kaugutmenge 4 g (1.-3. Durchgang).....	55
Tab. 26: Startrichtung beim Kauen der Kaugutmenge 8 g (1.-3. Durchgang).....	55
Tab. 27: Vom Probanden angegebene bevorzugte Kauseite .....	56
Tab. 28: Vom Probanden angegebene Händigkeit .....	56
Tab. 29: Zusammenfassung der Ergebnisse .....	57
Tab. 30: Ergebnisse verschiedener Studien zur durchschnittlichen Geschwindigkeit der Kaubewegungen .....	70
Tab. 31: Messergebnisse verschiedener Studien zur durchschnittlichen Dauer eines Kauzyklus .....	71



# 1 Einleitung und Problemstellung

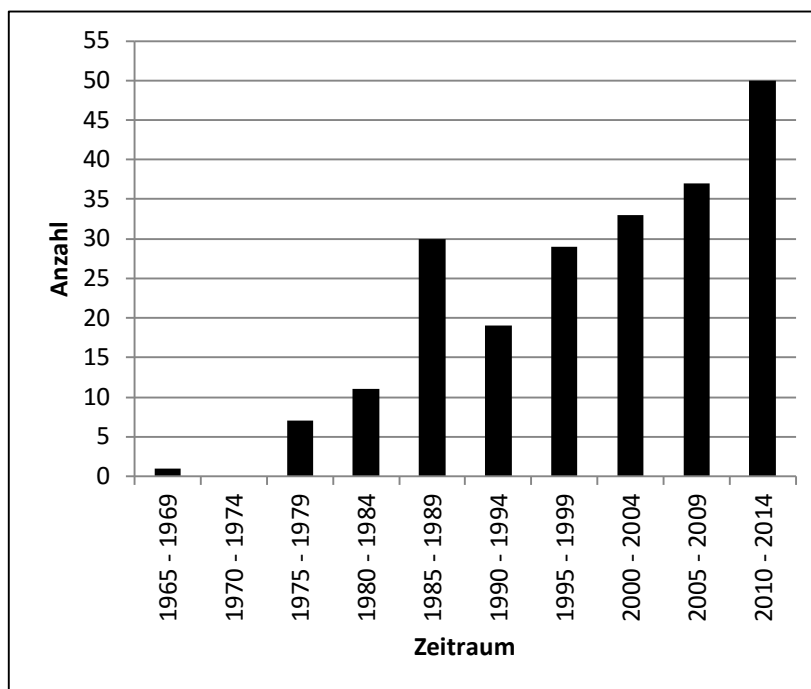
Das Kauen ist ein komplexer, im Detail noch nicht vollständig verstandener Vorgang, der von einer Vielfalt von Faktoren beeinflusst wird. Mit ihm beginnt die Aufbereitung der Nahrung zur Energie- und Nährstoffgewinnung bereits in der Mundhöhle durch die mechanische Zerkleinerung des Speisebolus sowie durch die enzymatische Aktivität des Speichels zur Aufspaltung der in der Nahrung enthaltenen Kohlenhydrate. Mit dem Verlust von Zähnen - auch wenn durch eine Prothese ersetzt – verändert sich das Kauverhalten, die Zerkleinerungsleistung, die sogenannte Kaeffizienz<sup>63</sup>, verschlechtert sich<sup>9, 26-28, 106, 20</sup>. Nahrung, welche intensives Kauen voraussetzt, um schluckbreit zu sein, gelangt schlechter zerkleinert in den Körper oder ihr Verzehr wird vermieden<sup>53, 185</sup>.

Der Einfluss des Zahnstatus und der angrenzenden Gewebe auf das Kauen und damit die Nahrungsaufnahme kann mithilfe von Kautests beurteilt werden. Bei gängigen Kautests werden Probanden aufgefordert, ein bestimmtes natürliches oder künstliches Kaugut (Testnahrungsmittel) eine festgelegte Dauer oder mit einer bestimmten Anzahl von Kauzyklen zu kauen und auszuspucken. Der erreichte Zerkleinerungsgrad der Nahrung wird anschließend gemessen<sup>54, 97, 118, 121, 166, 167</sup>. Weitere Methoden sind das Messen der bis zum finalen Schlucken benötigten Zeit<sup>20</sup> sowie die Ermittlung der Kaeffizienz mittels spezieller Kaugummi. Hierbei wird entweder der Gewichtsverlust des Kaugutes durch in Lösung gegangenen Zucker oder die Farbdurchmischung von zweifarbigem Kaugummi bestimmt<sup>7, 143, 155</sup>. Des Weiteren kann mit Fragebögen die Selbsteinschätzung von Patienten bezüglich ihrer Kaeffizienz ermittelt oder die Kaubewegungen mit unterschiedlichen Registriersystemen aufgezeichnet werden<sup>132, 176</sup>.

Obwohl das Kauen die wichtigste Funktion des stomatognathen Systems ist, widmete sich die Forschung bislang vergleichsweise wenig diesem Thema. Ein Eindruck über die Forschungsarbeit auf dem Gebiet der Kaufunktion des Menschen geben die Ergebnisse einer Literaturdatenbank-Analyse. Recherchiert wurde in der MEDLINE Datenbank mithilfe von PubMed und in den deutschsprachigen zahnärztlichen Zeitschriften „Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift“ (DZZ), „Das deutsche Zahnärzteblatt“ (ZWR), „Zahnärztliche Mitteilungen“ (ZM) sowie „Die Quintessenz“. Die erste Veröffentlichung zu diesem Thema erschien 1966<sup>3</sup>. Im Zeitraum 1965-6/2014 finden sich unter Verwendung der Suchkriterien „*chewing pattern*“, „*chewing movement*“ und „*chewing function*“ beziehungsweise

„*Kaumuster*“, „*Kaubewegungen*“ und „*Kaufunktion*“ nach Ausschluss von Case reports und Duplikaten 217 Referenzen. Im Vergleich dazu erhält man bei Eingabe des Schlüsselwortes „*dental caries*“ für diesen Zeitraum (ausschließlich PubMed-Suche) 32.059 Referenzen.

Seit der ersten Veröffentlichung über das Kauverhalten im Jahre 1966 nahmen Studien zu diesem Thema kontinuierlich zu (Abb. 1). Mit dem Aufkommen computergestützter Registriermethoden in den 1980er Jahren stieg die Anzahl an Veröffentlichungen zur Analyse von Kaubewegungen besonders stark an. Nach einem Rückgang an Veröffentlichungen Anfang der 1990er Jahre setzte sich der positive Trend bis heute fort. In den letzten fünf Jahren (2010-2014) erschienen fast 25% aller Veröffentlichungen zu diesem Thema.



**Abb. 1:** Zeitlich aufgeschlüsselte Darstellung der Literatur zum Begriff „Kaufunktion“ im Zeitraum von 1965-06/2014 (insgesamt 217 Referenzen).

Die Variationen im Studiendesign und die Zahl unterschiedlicher Registriersysteme sind äußerst vielfältig. Zusätzlich kommt es in Abhängigkeit von der verwendeten Registriermethode zu unterschiedlicher Beeinflussung der Kaufmuster. Die Datenlage ist daher inhomogen und die Vergleichbarkeit der verfügbaren Studien ist gering.

Für die vorliegende Arbeit wird das K7-Messsystem, ein Kinesiograph, verwendet, welches systembedingt im Vergleich zu anderen Messsystemen die geringste neuromuskuläre Beeinflussung des Kauverhaltens erwarten lässt.

Ziel der vorliegenden Studie ist die Überprüfung der aufgrund klinischer Erfahrung vermuteten Korrelation zwischen der Kaugutmenge und der Anzahl der Kauzyklen sowie der vertikalen Amplitude der Mundöffnung beim Kauen. Folgende Hypothesen sollen geprüft werden:

Hypothese I. Die Kaugutmenge beeinflusst nicht die Anzahl der Kauzyklen.

Hypothese II. Es besteht keine Abhängigkeit zwischen der Kaugutmenge und der vertikalen Amplitude der Unterkieferbewegung (maximale Mundöffnung).

Insbesondere soll untersucht werden, ob es einen Faktor gibt, um den sich die benötigte Anzahl von Kauzyklen bei steigender Kaugutmenge verändert. Sollte ein solcher bestehen, bieten sich Folgestudien mit teil- und unbezahnten oder prothetisch versorgten Probanden an. Über die Bestimmung des Kauzyklenverhältnisses lassen sich möglicherweise Unterschiede zum Kauen mundgesunder Personen feststellen. Darüber hinaus sollen das sagittale und transversale Bewegungsausmaß beim Kauen, die durchschnittliche Dauer von Kauzyklus und Kausequenz, die Geschwindigkeit der Unterkieferbewegungen sowie die Kaurichtung aufgezeichnet und bezüglich ihrer Abhängigkeit von der Kaugutmenge analysiert werden.

Die größte Anzahl an Studien, welche die Analyse von Kaubewegungen zum Inhalt haben, wurden mit kleinen und hinsichtlich der Funktion heterogenen Probandenkollektiven sowie unter Verwendung künstlichen Kaugutes durchgeführt<sup>12, 13, 31, 98, 99, 114, 164, 183, 192</sup>. Die für die vorliegende Studie vorgesehenen Untersuchungen erfolgen mit natürlichem Kaugut und an mund- und zahngesunden Probanden. Dadurch soll als Grundlage für weitere Studien eine Referenz-Datenbasis geschaffen werden, die ein physiologisches Kauverhalten von gesunden Probanden im Alter von 20-30 Jahren repräsentiert. Die vorliegende Studie soll einen wesentlichen Teilaspekt in der Entwicklung eines Tests zur Bestimmung der individuellen Kaueffizienz abdecken. Klinisch könnte ein solcher Test die therapeutisch wichtige Frage, ob und wie viele verlorengegangene Zähne zur Wiederherstellung der Kaufunktion ersetzt werden sollten, beantworten helfen.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Aufgaben und Strukturen des Kausystems

Der Mensch besitzt ein verhältnismäßig unspezialisiertes Gebiss vom omnivoren Typ (Allesfresser). Voll ausgebildet besteht es aus insgesamt 32 Zähnen, die sich in acht Schneidezähne (Inzisivi) und vier Eckzähne (Canini) zum Abtrennen einzelner Bissen, sowie 16 Backenzähnen (acht Prämolaren und zwölf Molaren) zum Zerquetschen oder Zermahlen der Nahrung gliedern. Dieser dentale Grundtypus ist ein gemeinsames Merkmal aller Säugetiere und wird als Heterodontie bezeichnet <sup>83</sup>. Die dritten Molaren (Weisheitszähne) sind zuweilen nicht angelegt, ein Gebiss mit 28 Zähnen wird daher klinisch als vollständig angesehen <sup>65</sup>.

Die Zähne der oberen und unteren Zahnreihe treffen bei geschlossenem Kiefer aufeinander, sie okkludieren. Dabei sind sie in der Lage, Nahrung zu zerschneiden, zu zermahlen und zu zernagen. Menschliche Zähne können in verschiedenen Positionen okkludieren. In der maximalen Interkuspitation (Schlussbiss) sind die Zähne maximal verzahnt, der Unterkiefer befindet sich zum Schädel in seiner maximalen Kraniallage. Für klinische Untersuchungen kann die maximale Interkuspitation als Referenz- und Startpunkt genutzt werden. In welcher Relation die Zähne während des Kauvorganges zueinander stehen, ist bei funktioneller Betrachtung unbedingt zu berücksichtigen. Der Unterkiefer bewegt sich für das Abbeißen von Nahrung nach vorn, sodass die Kanten der Schneidezähne aufeinander treffen. Kauen beinhaltet zudem laterale (Laterotrusionen) und vertikale Bewegungen des Unterkiefers, sodass die Seitenzähne auf der Seite, auf welcher die Nahrung zerkleinert wird (Kauseite), senkrecht übereinander gebracht werden. Währenddessen haben die Zähne der anderen Seite (Nichtarbeitsseite oder Balanceseite) in der Regel keinen Kontakt <sup>91</sup>. Die Seitenzähne besitzen ein Relief aus Höckern und Fissuren. So können obere und untere Seitenzähne ineinandergreifen. Die Fissuren dienen als Freiraum für die Höcker bei der Mahlbewegung sowie als Abflussrillen für die zerquetschte Nahrung <sup>157</sup>.

Bei entspannter Muskulatur und bei aufrechter Körperhaltung der Mensch die sogenannte „Ruhelage“ ein, in dieser haben die Zähne keinen Kontakt, es besteht ein interokklusaler Abstand von 2-4 mm <sup>84</sup>.

Als Kaumuskeln werden jene Muskeln bezeichnet, welche den Unterkiefer während des Kauens bewegen. Darüber hinaus spielen beim Kauvorgang aber noch weitere Muskeln wie die der Zunge, der Wangen und Lippen eine wichtige Rolle. Klassifizieren kann man die Kaumuskeln nach ihrer Lage: In Muskeln zwischen Schädel und Unterkiefer (*M. massetericus*, *M. temporalis*, *M. pterigoideus*) und Muskeln zwischen Unterkiefer und Zungenbein (*M. digastricus anterior*, *M. genohyoideus*, *M. mylohyoideus*). Eine weitere Möglichkeit ist die vereinfachte Einteilung in Adduktoren (*M. massetericus*, *M. temporalis*, *M. pterigoideus lateralis*) und Abduktoren (*M. digastricus anterior*, *M. genohyoideus*, *M. mylohyoideus*). Hinzu kommen die akzessorischen Kaumuskeln (infrahyoideale Muskulatur), welche die Kieferöffner unterstützen und zudem beim Schluckvorgang eine bedeutende Rolle spielen. Die Gesichts- und Wangenmuskulatur verschließt die Mundhöhle und kontrolliert zusammen mit der Zunge die Position des Speisebolus zwischen den okkludierenden Flächen der Zähne <sup>85, 177</sup>.

Das Kiefergelenk enthält bindegewebige sowie knöcherne Strukturen. Letztere setzen sich aus Anteilen des Temporalknochens (Fossa und Tuberkulum) und dem Kondylus (*Processus condylaris mandibulae* mit *Caput mandibulae*) der Mandibula zusammen. Die Gelenkgrube (Fossa mandibularis) ist eine konkave Vertiefung des Temporalknochens, an die in ventraler Richtung das konvexe Tuberculum articulare (Eminentia) anschließt. Diese Strukturen spielen für die Form der Kaubewegungen eine große Rolle. Die Mundöffnungsbewegung ist eine Dreh-Gleit-Bewegung, sie besteht aus einer initialen Rotation und weist im Verlauf eine zusätzliche Translation auf. Während der rotativen Komponente bewegt sich der Kondylus in der Gelenkgrube, die translative Komponente entsteht durch Gleiten des Kondylus entlang des Tuberculum articulare. Bei Kiefervorschub (Protrusion) zum Abbeißen überwiegt die translative Komponente, bei weiter Mundöffnung ist der Anteil der Rotation höher <sup>1, 84</sup>. Die Kaubewegungen werden nicht nur durch die Bahnen der Kondylen, sondern zusätzlich durch Zahnführungen bestimmt. Durch das Gleiten der unteren Incisivi entlang der Palatinalflächen der oberen Schneidezähne wird die rotative Komponente mitbestimmt, sie ist somit auch von der Ausprägung des vertikalen und horizontalen Frontzahnüberbisses abhängig. Für den zur Seite verlaufenden Anteil der Kaubewegungen spielen die Eckzähne der jeweiligen Laterotrusionsseite eine große Rolle. Während sie bei Lateralbewegungen aneinander entlang gleiten, sorgen sie dafür, dass die restlichen Zähne diskudieren. Man spricht in diesem Zusammenhang von einer Eckzahn-

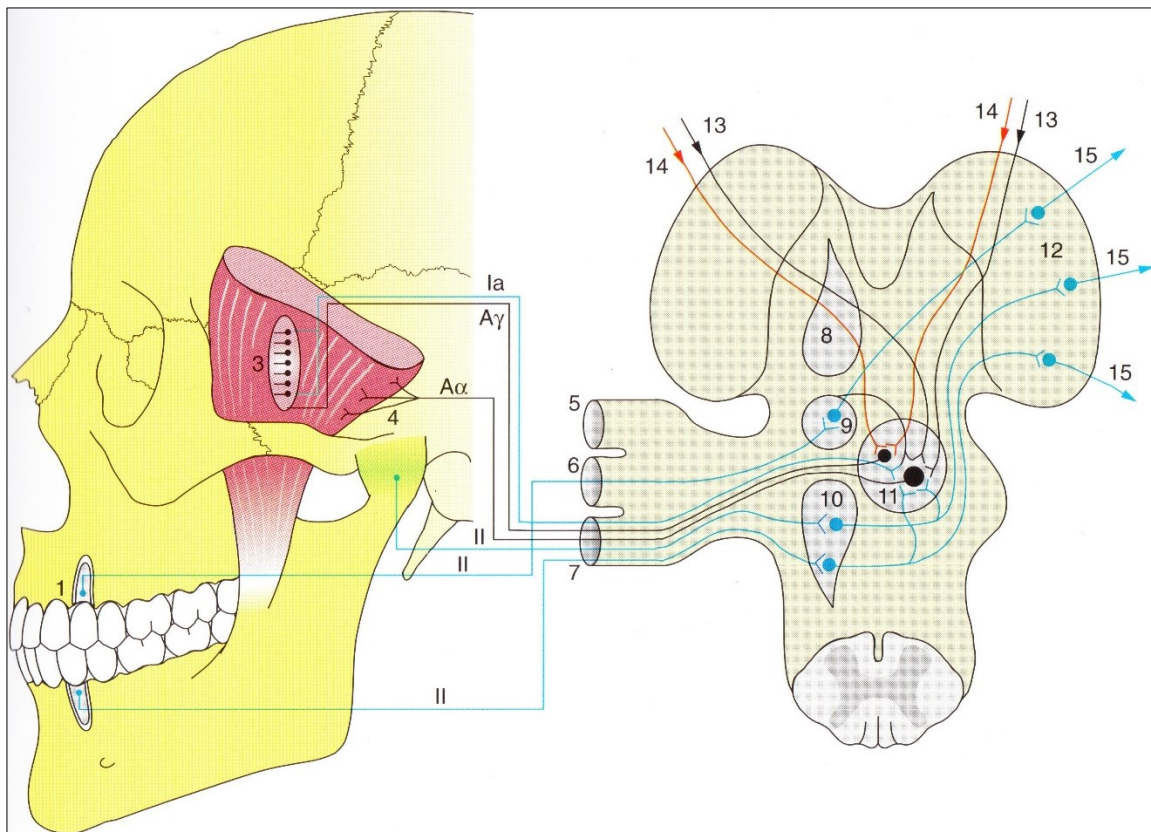
führung. Auch eine Beteiligung von weiteren Frontzähnen oder Seitenzähnen kann physiologisch bestehen <sup>65</sup>.

Ein weiterer wichtiger Bestandteil des Kauorgans ist die Zunge. Sie spielt eine Schlüsselrolle bei der Kontrolle und dem Transport von aufgenommener Nahrung. Dazu ertastet sie die Nahrung, registriert ihren Geschmack, mischt sie und platziert einen Speisebolus zwischen den Zahnreihen. Dabei hängen ihre Bewegungen auch mit dem Öffnen und Schließen des Unterkiefers zusammen. Die meisten Bewegungen führt sie aus, während die Zahnreihen voneinander getrennt sind, beim Kieferschluss wird die Zunge nach vorne und an den Gaumen bewegt. Zu Beginn jedes Schluckens schiebt sie den Speisebolus nach hinten Richtung Pharynx. Bei weichen Speisen, wie zum Beispiel Bananen, kann die Zunge selbst als Zerkleinerungsorgan dienen, indem sie diese gegen den harten Gaumen quetscht und so zerdrückt <sup>56, 177</sup>.

Weitere am Kauen beteiligte Organe sind die Speicheldrüsen. Sie liefern den Speichel, welcher zu etwa 99,5 % aus Wasser besteht und etwa 0,5 % gelöste Bestandteile, wie Mucine (Glykoproteine), diverse weitere Proteine, Mineralien und ein Verdauungsenzym, die  $\alpha$ -Amylase, enthält <sup>83</sup>. Die Aufgabe des Kauens, die Zerkleinerung des Speisebolus und damit die Oberflächenvergrößerung, dient dem verbesserten Angriff der im Speichel enthaltenen  $\alpha$ -Amylase. Diese Glycosidase spaltet hydrolytisch Polysaccharide (z. B. Stärke) an den inneren  $\alpha(1-4)$ -Glykosidbindungen und leitet somit ihren Abbau ein. Darüber hinaus macht der Speichel die Nahrung gleitfähig und erleichtert dadurch das Kauen und Schlucken, wofür er in unterschiedlichen Viskositäten produziert werden kann. Die Gl. parotis liefert dünnflüssigen (serösen) Speichel, die anderen großen Speicheldrüsen bilden Speichel schleimig-zähflüssiger Beschaffenheit (Gl. submandibularis: seromukös, Gl. sublingualis: mukoserös). In der Mundhöhle findet man ein Gemisch dieser verschiedenen Speichelarten vor. Pro Tag sezerniert der erwachsene Mensch insgesamt etwa 0,6 bis 1,5 Liter Speichel. Auch ohne Nahrungsaufnahme wird ständig Speichel abgesondert. Diese „Basalsekretion“ (etwa ein halber Liter pro Tag) ist eher mukös, wird die Produktionsrate gesteigert, wird der Speichel mehr serös. Verminderte Speichelproduktion kann krankheitsbedingt (z. B. beim Sjögren-Syndrom) oder therapiebedingt (z. B. durch eine Strahlentherapie) und auch verhaltensbedingt (z. B. durch eine geringe Trinkmenge oder die Einnahme bestimmter Medikamente und Rauschdrogen) sowie altersbedingt auftreten <sup>186</sup>.

## 2.2 Prinzipien der neuromuskulären Steuerung der Unterkieferbewegungen

Um präzise Unterkieferbewegungen zu erzeugen, müssen über aufgenommene Reize diverser Rezeptoren aus Schleimhaut, Kiefergelenk, Zähnen, Parodontium, Auge und Ohr (epitheliale Mechano- und Thermorezeptoren, Muskelspindeln und Chemorezeptoren der Geschmacksknospen und Sehnenspindeln) über afferente Nervenbahnen zum zentralen Nervensystem (ZNS) gelangen. Die afferenten Neurone gehören zum Nervus trigeminus, Nervus facialis, Nervus glossopharyngeus sowie Nervus vagus. Sie leiten die Erregungen zu ihren terminalen Kernen (im Bereich von Hirnstamm und oberem Zervikalmark) in das zentrale Nervensystem (Abb. 2). Von hier aus gelangen die Informationen zum ebenfalls im Hirnstamm liegenden, als „Kauzentrum“ bezeichneten Ansammlung von Neuronen.



**Abb. 2:** Schematische Darstellung der zentralen und peripheren neuromuskulären Steuerung. Die Muskelaktivität kann sowohl peripher als auch zentral beeinflusst werden. Emotionale Einflüsse steigern über  $\gamma$ -Neurone den Muskeltonus. 1 Desmodontalrezeptoren, 2 Gelenkkapselrezeptoren, 3 Muskelspindeln (Dehnung), 4 Motorische Endplatte, 5-7 N. trigeminus (Ggl. Semilunare), 8 Tractus mesencephalicus, 9 Ncl. sensorius superior (N. V), 10 Ncl. sensorius inferior (N. V), 11 Ncl. motoricus (N. V), 12 Thalamus, 13 Absteigende Bahnen vom Cortex ( $\alpha$ -Motorik = „Willkürmotorik“), 14 absteigende Bahnen vom limbischen System ( $\gamma$ -Motorik = „psychovegetative Einflüsse“), 15 aufsteigende Bahnen zum Cortex („Bewusstsein“). Aus: „Thieme Farbatlanten: Funktionsdiagnostik und Therapieprinzipien“, mit freundlicher Genehmigung des Verfassers <sup>17</sup>.

Nach zentraler Verarbeitung werden über efferente Nervenbahnen von Nervus trigeminus, Nervus facialis, Nervus glossopharyngeus, Nervus vagus und Nervus hypoglossus einige Muskelgruppen aktiviert, während andere gehemmt werden <sup>179</sup>.

Das Kauen ist eine unbewusste Aktivität, kann aber jederzeit bewusst kontrolliert werden <sup>130</sup>. Die Koordination und Rhythmik des Kauens geht auf die alternierende Aktivierung zweier einfacher Hirnstammreflexe zurück: den Kieferöffnungsreflex, der von Kaudruck oder taktiler Stimulierung im Bereich von Mund und Lippen hervorgerufen wird, und den Kieferschlussreflex als Folge von Muskeldehnung während des Öffnens <sup>75, 162</sup>: Während des Öffnens werden die Adduktoren gedehnt, was wiederum den Kieferschluss auslöst und damit das Zerquetschen des Speisebolus zur Folge hat. Auf das Schließen folgt wieder eine Öffnungsbewegung, hervorgerufen durch die Stimulierung von Rezeptoren des Parodonts und der Weichgewebe. Ein Kauvorgang beginnt also mit der Mundöffnung bei der Aufnahme von Kaugut und erhält sich bis zum Schlucken aufgrund der alternierenden Reflexe selbst. Ort der Entstehung des rhythmischen Kaumusters ist das bereits erwähnte Kauzentrum im Hirnstamm (pattern generator). Diese Ansammlung von Neuronen, initiiert und kontrolliert die sich wiederholenden Kauzyklen, kann aber von übergeordneten Zentren und sensorischem Feedback beeinflusst werden. Außerdem ist diese Formation für die präzise zeitliche Steuerung von synergistischen und antagonistischen Muskeln verantwortlich, woraus gezielte Bewegungsmuster resultieren <sup>30</sup>. Das sensorische Feedback erklärt die Koordination von Zunge, Lippen und Gelenken, welche Notwendig ist, um die Nahrung präzise im Munde zu bewegen. Es ist zudem der Grund, warum das Kaumuster je nach Kaugut unterschiedlich ist und abrupte Wechsel von Kauzyklus zu Kauzyklus stattfinden können. Während die Hirnrinde der übergeordnete Einfluss auf Bewegungen ist, unterhält der Hirnstamm die im Normalfall unbewusste Selbstregulation der Körperfunktionen <sup>130</sup>. Es ist also möglich, Kaubewegungen im Hirnstamm gänzlich ohne sensorische Einflüsse zu programmieren, die resultierenden Bewegungen wären allerdings aufgrund fehlenden Feedbacks höchst ineffizient und können eine erhöhte Verletzungsgefahr für das Kausystem aufweisen <sup>100</sup>.

Sobald ein Individuum ein effizientes Kaumuster gefunden und erlernt hat, wird es wiederholt. Es wird als ein Muskel-Engramm bezeichnet. Kauen kann als ein sehr komplexer Reflex aufgefasst werden. Der „pattern generator“ interagiert zudem mit dem ebenfalls im

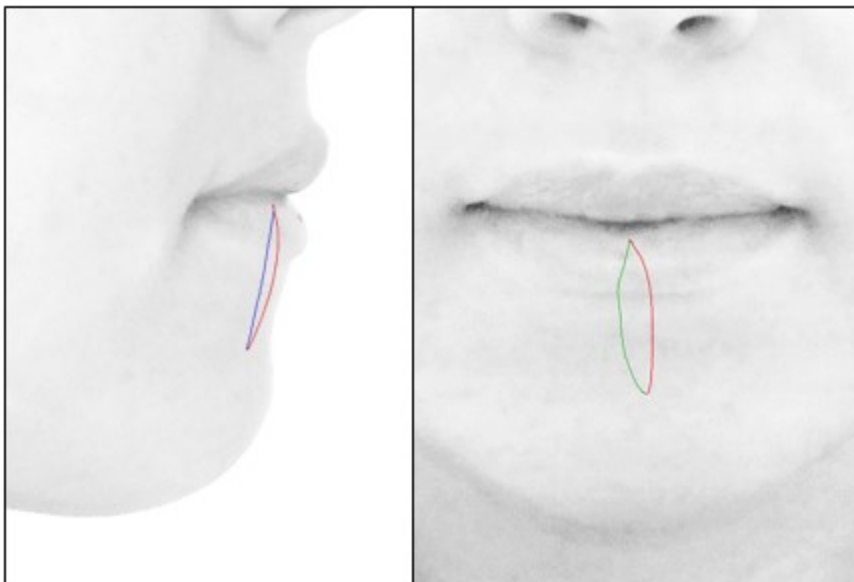


Hirnstamm liegenden aufsteigenden retikulären Aktivierungssystem, mit dem limbischen System sowie dem Hypothalamus. Somit können diese Strukturen jeden Stimulus, der vom Cortex gegeben wird sowie die neuronale Antwort modifizieren, und sogar unnötige Muskelaktivitäten hervorrufen <sup>130</sup>.

### 2.3 Die Unterkieferbewegungen beim Kauen

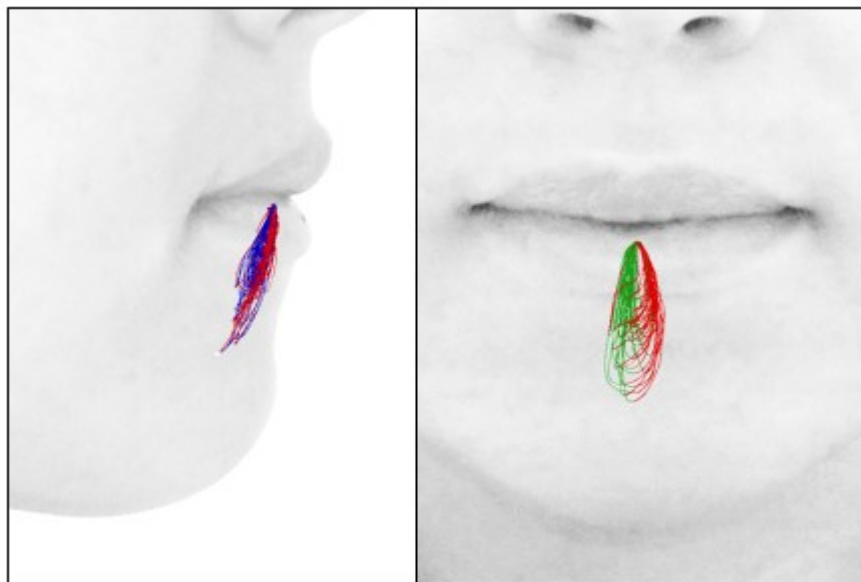
Eine Kausequenz, die Kaubewegungen von der Aufnahme eines Speisebolus bis zum finalen Schlucken, setzt sich aus einer variierenden Anzahl von Kauzyklen zusammen. Ein Kauzyklus besteht aus Öffnungsphase und Schließphase. Eine Schließphase kann in die schnelle Schließphase und die langsame Schließphase unterteilt werden. In der langsamen Schließphase, die Phase der hohen Kraftentfaltung, wird die Nahrung während des „power stroke“ zwischen den Seitenzähnen zerquetscht <sup>101</sup>. Gleich darauf folgt eine kurze okklusale Haltephase (Interkuspidationsphase), die nicht zwingend mit der habituellen Interkuspidation identisch ist <sup>57-59, 184</sup>.

Kaubewegungen können mit Registriersystemen aufgenommen und grafisch dargestellt werden. Eine Öffnungs- und Schließbewegung ergibt einen Kauzyklus (Abb. 3).



**Abb. 3:** Kauzyklus in sagittaler und frontaler Ansicht. Blaue und grüne Spur: Öffnungsbewegung, rote Spuren: Schließbewegung.

Das Kaumuster ergibt sich aus überlagert aufgezeichneten Kauzyklen (Abb. 4). Es gibt diverse Einflüsse auf das Kauen, sodass viele unterschiedliche Bewegungsbahnen beschrieben werden und Kaumuster intra- und interindividuell variieren <sup>1, 3, 44</sup>.



**Abb. 4:** Kausequenz in sagittaler und frontaler Ansicht. Aus der Überlagerung der einzelnen Kauzyklen ergibt sich das individuelle Kaumuster. Blaue und grüne Spuren: Öffnungsbewegungen, rote Spuren: Schließbewegungen.

AHLGREN unterschied bei seiner Untersuchung an Schulkindern sieben verschiedene Kautypen <sup>3</sup>. Ähnlich ging PRÖSCHEL vor, welcher die Richtung und Ausprägung der Bewegungsbahnen bestimmte und anhand dieser acht Kaumustergrundtypen definierte. Er stellte fest, dass die wenigsten Probanden ein festes Kaumuster besaßen, sondern es der Nahrungskonsistenz anpassten <sup>144</sup>. Sowohl AHLGREN, BATES et al., als auch NEILL et al. <sup>2, 11, 122</sup> beschreiben einen tränenförmigen Kauzyklus. Die Öffnungsbahn verläuft in der Medianebene, das Schließen findet weiter lateral auf der Kauseite statt. Somit ergibt sich beim Kauen auf der rechten Seite eine Bewegung des Unterkiefers im Uhrzeigersinn (vom Betrachter aus). Ist die Kauseite hingegen links, verläuft das Bewegungsmuster gegen den Uhrzeigersinn ab. Dysfunktionelle Kaumuster wiesen unregelmäßige, selbstüberkreuzende Bewegungen auf, Abrasionsgebisse eckige Bewegungsformen <sup>44, 101, 102</sup>.

Kauen kann beidseitig, also abwechselnd rechts und links stattfinden, bevorzugt auf einer Seite oder ausschließlich einseitig <sup>150, 171</sup>. Konstantes Kauen auf einer Seite bezeichnet man als Kauseitenpräferenz. Es gibt unterschiedliche Angaben zum Auftreten einer Kau-

seitenpräferenz in der Bevölkerung. Die rechte Seite scheint von der Mehrheit der „seitigen“ Personen bevorzugt zu werden <sup>32, 153</sup>, ob sie vom Zentralnervensystem bestimmt ist <sup>60, 140</sup> oder hauptsächlich periphere Faktoren zur Ausprägung einer habituellen Kauseite führen <sup>153</sup>, ist nicht abschließend geklärt. Bilateral alternierendes Kauen wird als Normalzustand bezeichnet, da die gleichmäßigen Belastungen sowohl für die Stimulation des parodontalen Gewebes als günstig gelten, als auch zur Reinigung der Zähne und okklusalen Stabilität <sup>96</sup>. Einseitiges Kauen gilt als weniger effektiv und kann mit temporomandibulären Dysfunktionen assoziiert sein <sup>153</sup>. Neben Kiefergelenks- und Muskelschmerzen sind asymmetrischer Stützzonenverlust, Zahnersatz in Form von Prothesen, Balancekontakte, Zähnepressen und eine niedrige Schulbildung mit einer Kauseitenpräferenz assoziiert <sup>11, 32</sup>.

PRÖSCHEL et al. <sup>147</sup> stellten in ihrer Untersuchung fest, dass von funktionell beschwerdefreien Personen die Mehrzahl (85%) bei der Nahrungszerkleinerung den Mund aus der habituellen Interkuspitation heraus zur Balanceseite hin öffnet, und dabei auf halbem Wege zwischen habitueller Interkuspitation und maximaler vertikaler Öffnung die mittlere maximale Geschwindigkeit von 65,9 mm/s erreichen. Es folgt ein Abbremsen und ein Wechseln der Richtung zur Kauseite. Das Schließen geschieht mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 81,6 mm/s. Die Maximalgeschwindigkeit wird 9-11 mm vor der habituellen Interkuspitation erreicht. Die vertikale Mundöffnung beträgt im Durchschnitt 15,3 mm, die durchschnittliche Bewegung nach anterior 5,0 mm. Durchschnittlich beträgt die Öffnungsdauer 0,42 s, die Schließdauer 0,44 s und die Gesamtdauer eines Kauzyklus 0,86 s. Laut Angaben von ASH und RAMFJORD sowie PAMEIJER beträgt die durchschnittliche Gesamtdauer 0,7 s <sup>8, 134</sup>.

Vor dem finalen Schluckakt werden einige von der regulären Form abweichende Kauzyklen durchgeführt, unter anderem, um das Vestibulum von Partikeln zu reinigen. Hinzu kommt, dass beim Menschen in der überwiegenden Zahl von Kausequenzen intermittierendes Schlucken auftritt <sup>56, 66, 122, 146</sup>.

Ein Kauzyklus dauert im Durchschnitt 0,7-0,8 s etwa 0,2 s davon entfallen auf die okklusale Endphase. Während dieser findet für etwa 0,1 s der „power stroke“ statt, die Phase der hohen Kraftentfaltung <sup>101</sup>. Damit ist die Phase des Zahnkontaktes bei einer Schließbewegung etwas länger als bei einer Öffnungsbewegung <sup>150</sup>. Zu Beginn einer Kausequenz finden oft keine Zahnkontakte statt, mit zunehmender Zerkleinerung des Kaugutes werden

kurze Kontakte immer häufiger<sup>88, 96</sup>. Nach AHLGREN<sup>3</sup> kommt es bei 84% aller Kauzyklen zum Zahnkontakt in der habituellen Interkuspitation. Zusammengerechnet besteht laut PAMEIJER et al.<sup>134</sup> innerhalb von 24 Stunden etwa 9 Minuten Zahnkontakt.

Für die durchschnittliche vertikale Amplitude der Mundöffnung werden Werte von 13 bis 20 mm angegeben, im Verlauf einer Kausequenz und mit der einhergehenden Verkleinerung der durchschnittlichen Partikelgröße nimmt sie ab<sup>3, 66, 117, 122, 146</sup>. Das Ausmaß des seitlichen Gleitens hängt einerseits vom Kaugut, andererseits vom okklusalen Relief und der Verzahnung ab<sup>3</sup>. Personen mit deutlich abradierten Kauflächen zeigen einen stärkeren Lateralversatz beim Kauen als Personen ohne Abrasionen<sup>101, 102</sup>. Für die mittleren lateralen Bewegungsausmaße finden sich Werte von 3-6 mm<sup>66, 117, 122, 146</sup>.

Während des Kauens werden beim „power stroke“ im Mittel Kräfte von 150 bis 250 N erreicht, mit Maxima von 500 bis 750 N<sup>49, 156</sup>. BAKKE et al. maßen Maximalkräfte von 482 N im Mittel, MIURA et al. 408 N, BRAUN et al. hingegen 738 N<sup>10, 15, 113</sup>. Die Elevatoren entwickeln die höchste Kraftentfaltung bei einer Schneidekantendistanz von 14-20 mm<sup>104</sup>. Erwartungsgemäß sind die Kaukräfte auch von der Art des Kauguts abhängig<sup>160</sup> und in der Regel in der Anfangsphase einer Kausequenz größer.

Die Kaubewegungen sind derart individuell, dass sich bei einem Normalkollektiv kein fester Parameter-Messwert findet. Die angeführten Werte sollten als ungefähre Richtwerte aufgefasst werden und einen Eindruck der Bewegungsdimensionen verschaffen. Die Schwankungen zwischen Kaubewegungsparametern bezogen auf die Einzelperson sind bei weicher Nahrung und Öffnungsbewegungen größer als bei zäher Nahrung und Schließbewegungen. Außerdem wurde festgestellt, dass bei Personen mit flachem Okklusalfächenrelief und eckigen Kaumustern die Variationen der Bewegungsbahnen im zahngeführten Bereich geringer sind als bei Personen mit steilen Führungsflächen und runden, tropfenförmigen Kaumustern<sup>146</sup>.

## 2.4 Einflüsse auf das Kaumuster

Die große Variabilität der Kaumuster weist auf multifaktorielle Einflüsse einschließlich natürlicher Schwankungen im psychischen und physischen Zustand hin<sup>64</sup>. Welcher Faktor sich am stärksten auf das Kaumuster auswirkt, ist nicht eindeutig geklärt<sup>188</sup>.

Man nimmt an, dass die Kaueffizienz von der Zahl der Zähne in funktioneller Okklusion abhängt und proportional zur Fläche der Okklusionskontakte zwischen gegenüberliegenden Zähnen ist <sup>4, 55</sup>. Ein Verlust von Molaren wirkt sich auch auf die Kaukraft aus, was wiederum die Kauleistung beeinflusst. Wider Erwarten wird ein Verlust an Zähnen aber nicht vollständig durch eine Verlängerung der Kaudauer kompensiert <sup>4, 52, 69, 131</sup>. Ob somit bei Patienten mit Zahnverlusten größere Partikel geschluckt werden oder ein Ausgleich über eine Erhöhung der Kauzyklenzahl stattfindet, ist nicht sicher belegt.

Nicht nur die Form der Kaubewegungen und Größe der okkludierenden Flächen bestimmen die Kauleistung, sondern auch zahlreiche weitere Faktoren wie die Anzahl der Kauzyklen, die Entfaltung des Kaudrucks, die Kaudauer sowie die Kopfhaltung <sup>115, 158</sup>. Es existieren wenige Studien, welche das Kaumuster bei unterschiedlichen Kaugutmengen beleuchten. Die Probandenzahlen dieser Studien waren meist gering, in Studien von LUKAS und LUKE <sup>98</sup> und LUCAS et al. <sup>99</sup> waren es sechs Probanden. BHATKA et al. <sup>12</sup> sowie WINTERGERST et al. <sup>192</sup> untersuchten 38 Probanden, SHIGA et al. <sup>164</sup> zehn, BLISSETT et al. <sup>13</sup> sechs, FORDE et al. <sup>39</sup> bezogen 15 Probanden ein. Ergebnisse dieser Untersuchungen sind: Die Kauzyklen vergrößern sich mit steigendem Gewicht und Volumen eines Speisebolus hinsichtlich Öffnungsamplitude und Lateralversatz. Die Anzahl der Kauzyklen bis zum Zeitpunkt des reflektorischen Schluckens steigt, trotzdem ist der Zerkleinerungsgrad der Nahrung möglicherweise geringer <sup>98, 164</sup>.

Die Amplitude der Mundöffnung ist proportional zu Kaugutvolumen und –gewicht. Sie sinkt exponentiell im Verlauf der Kausequenz, also mit steigender Anzahl von Kauzyklen <sup>13, 68, 192</sup>. Das Ausmaß dieser Veränderungen ist allerdings nach wie vor nicht eindeutig geklärt, zur Kaugeschwindigkeit bei unterschiedlichen Kaugutmengen lassen sich keine Daten finden. Außerdem hängt das Kaumuster davon ab, ob die Nahrung einen zusammenhängenden Bolus bildet, oder sich die Partikel im gesamten Mundraum verteilen. Je mehr Aufwand es für die Zunge ist, das Kaugut zwischen den Seitenzähnen zu positionieren, desto größer ist die Differenz zwischen der Weite der Mundöffnung und der Partikelgröße <sup>183</sup>. Ferner beeinflusst die Konsistenz der Nahrung das Kaumuster. Werden harte Speisen gegessen, verringert sich die Geschwindigkeit der Unterkieferbewegungen, während die Kaukraft, Dauer sowie Anzahl der Kauzyklen stark ansteigen <sup>180</sup>. Darüber hinaus wird der Zeitpunkt des Schluckens vermutlich stark dadurch beeinflusst, wie

schnell der Speisebolus durch den Speichel aufgeweicht wird. Wie viel Durchspeichelung notwendig ist, hängt nicht nur von Größe und Gewicht des Kaugutes ab, sondern auch von seiner Konsistenz und Oberfläche. Bei größeren Kaugutmengen ist die Oberflächenvergrößerung während der Zerkleinerung höher, folglich dauert es länger, bis die Nahrung schluckbereit ist <sup>98</sup>. So spielt in diesem Zusammenhang auch die individuelle Quantität und Qualität der Speichelsekretion eine Rolle. Zahlreiche Faktoren, wie Größe des Zahnbogens, Aktivität der perioralen Muskulatur, Alter und Geschlecht nehmen ebenfalls Einfluss auf das Kaumuster <sup>158</sup>.

Darüber hinaus können sich auch Stressoren und akustische Empfindungen auf das Kaumuster auswirken. VAN DER BILT et al. <sup>182</sup> führten eine Studie durch, in der sie Probanden in unterschiedlichen Reihenfolgen Augen und/oder Ohren verschlossen oder ohne Sinne zu maskieren, kauen ließen. Sie stellten eine Beeinflussung der Kauzyklendauer durch Verschließen der Ohren sowie das Verdecken der Augen fest, wenn die Probanden nicht direkt zuvor unmaskierte Durchgänge durchgeführt hatten und somit nicht an normales Kauen gewöhnt waren. Musik kann dazu führen, dass Geschmack wohlwollender beurteilt wird und die Dauer einer Mahlzeit sowie die Nahrungsaufnahme steigen <sup>38, 172</sup>. Das Hungergefühl hatte in einer Studie von MC KIERNAN <sup>110</sup> keinen Einfluss auf das Kaumuster.

Der prothetische Ersatz verlorengegangener Zähne führt nicht zwangsläufig zu einer subjektiv verbesserten Kauleistung. Patienten klagen trotz prothetischer Versorgung oftmals über Beeinträchtigungen beim Kauen, oder sehen keine Notwendigkeit, ihre Prothesen bei den Mahlzeiten zu tragen <sup>46, 181</sup>.

In ihrer Untersuchung stellten LOTZMANN und KOBES <sup>94</sup> fest, dass die Bewegungsbahnen bei Messungen eindeutig vom Gewicht und der Schwerpunktlage des verwendeten Registriergerätes beeinflusst werden. Daher ist bei der Bewertung aller Studien, die sich mit der Analyse des Kauens beschäftigen <sup>5, 12, 18, 19, 36, 40, 42, 43, 45, 61, 66, 71, 77, 80, 86, 87, 111, 117, 129, 133, 138, 139, 141, 174, 178, 184, 187, 189-191, 195, 196</sup>, zu berücksichtigen, dass die verwendeten Registersysteme wie Axiographen und Pantographen aufgrund ihrer Sperrigkeit und ihres Gewichtes zu einer artifiziellen Veränderung des Kaumusters geführt haben können. Mit diesen Registersystemen gewonnene Daten sind somit mit Vorsicht zu interpretieren.

Eine Methode, um die Kauleistung vor allem älterer Menschen zu beurteilen, ist der von WÖSTMANN et al.<sup>193</sup> sowie NGUYEN<sup>125</sup> beschriebene Kautest. Dabei wird die Zerkleinerungsleistung anhand der Partikelgröße nach bestimmter Kaudauer zur Beurteilung der Kaufunktion herangezogen. Karottenscheiben standardisierter Größe (2 cm x 2 cm x 1 cm) müssen vom Probanden 45 Sekunden so gut wie möglich zerkleinert werden, wobei kein Bissen geschluckt werden darf. Nach Ausspeien der Partikel wird der Zerkleinerungsgrad der Partikel visuell beurteilt und das Ergebnis nach einer sechsstufigen Bewertungsskala eingeordnet. Die tatsächlich geschluckte Partikelgröße bleibt allerdings unklar, da offen bleibt, ob ein Proband mit eingeschränkter Zerkleinerungsleistung zum Ausgleich eine größere Zahl von Kauzyklen bis zum Schlucken ausführt.

## **2.5 Anforderungen an ein Kaugut bei der Durchführung von Studien**

Hinsichtlich der Qualität des für Studien verwendeten Kaugutes gibt VAN DER BILT<sup>14</sup> an, dass aufgrund der hohen Korrelation der bis zum Schlucken ausgeführten Kauzyklenzahlen von natürlichem (Erdnüsse) und künstlichem Kaugut (Optosil), sowohl die Brauchbarkeit des natürlichen, als auch des künstlichen Kaugutes bewiesen sei. Vorteile von künstlichem Kaugut sind die gute Kontrollierbarkeit von Form und Größe sowie die genau bekannten und konstanten physikalischen Eigenschaften. Bei natürlichem Kaugut ist dies schwieriger<sup>166</sup>. Allerdings können in Studien mit künstlichem Kaugut die Partikel nicht heruntergeschluckt werden. Es ist nicht sicher geklärt, dass künstliches Kaugut nicht zur Ergebnisverfälschung führt. Das Wissen des Probanden über die Tatsache, dass die entstehenden, ungenießbaren Partikel nicht geschluckt werden dürfen, hat sicher Auswirkungen auf den gesamten Kauvorgang. Zudem hat auch ungewöhnlicher Geschmack und Geruch Einfluss auf das Kauen<sup>123</sup>.

Die Wahl des Kaugutes sollte nach genauer Überlegung erfolgen und begründet werden. Das perfekte Kaugut besitzt folgende Eigenschaften:

- Geschmack, der auf breite Zustimmung stößt
- Konsistenz ähnlich vieler anderer Lebensmittel und weder zu hart noch zu weich. Zu beachten ist außerdem, wie sich die Konsistenz durch den Speichel verändert.
- Lagerfähigkeit und konstante Konsistenz, um Reproduzierbarkeit zu gewährleisten
- schluckbereit nach adäquater Zeit

- genaue Portionierbarkeit
- kein Auslöser allergischer Reaktionen

Es gibt keine übereinstimmende Empfehlung für ein bestimmtes Kaugut, da bislang kein Produkt gefunden wurde, das alle geforderten Eigenschaften vereint. Studien, in denen das Kauen bei weichem und hartem Kaugut verglichen wurde, zeigen, dass sich die Nahrungskonsistenz auf das Kaumuster auswirkt. Um Studienergebnisse zum Kauen vergleichen zu können, ist es daher wichtig, dass die entsprechenden Versuche mit identischem Kaugut durchgeführt wurden.

## **2.6 Registrierung von Kaubewegungen**

Geräte zur Registrierung von Unterkieferbewegungen werden verstärkt etwa seit den sechziger Jahren des letzten Jahrhunderts entwickelt. Zu den ersten Geräten zählen der als STUART-Recorder bezeichnete Gnathograph (1960) <sup>173</sup> sowie der Quick-Analyser nach LEE (1969) <sup>82</sup>. GRIFFIN und MALOR <sup>47</sup> verwendeten einen Kinematograph (1974), LUCKENBACH <sup>79</sup> entwickelte wenig später das ECR-System (elektronisches computergestütztes Registrier-System bzw. artex-CompuGnath System) (1981). Durch ihre Weiterentwicklung und Kombination mit leistungsfähigeren Computern stehen mittlerweile Registriersysteme zur Verfügung, mit denen gesamte Kaumuster aufgezeichnet werden können. Der diagnostische Aussagewert von Kaufunktionsuntersuchungen und ihr Einfluss auf die Therapie wird allerdings kontrovers diskutiert <sup>88, 145, 148</sup>, da schon allein der Registriervorgang das Kauen sensorisch und motorisch beeinflussen kann. Vollkommen ungestörtes Kauen als Voraussetzung für artefaktfreies Aufzeichnen ist durch kein Registriersystem gegeben. Moderne computergestützte Geräte mit geringem Gewicht lassen eine geringere neuromuskuläre Beeinflussung des Kauvorganges erwarten. Die folgenden Ausführungen sollen einen Überblick über die gängigen Systeme sowie deren jeweiliges Prinzip geben.

Zum einen unterscheidet man bei den Funktionsprinzipien zwischen optoelektronischen, elektromechanischen und mit Ultraschall arbeitenden Systemen. Zum anderen differenziert man zwischen Systemen mit mechanischer Verbindung zwischen stationär und be-



weglich angebrachten Sensoranteilen und berührungslosen Systemen. Letztere haben den Vorteil, dass Reibung zwischen den Systemkomponenten ausgeschlossen ist.

Während zu Beginn der Registrierung vorwiegend zweidimensional aufzeichnende Systeme zur Verfügung standen, verwendet man heute dreidimensional aufzeichnende, sodass alle Rotations- und Translationsbewegungen dargestellt werden können.

Des Weiteren kann man nach der Lage der Registrierelemente zwischen gelenknahen sowie gelenkfern aufzeichnenden Verfahren unterscheiden (Tab. 1).

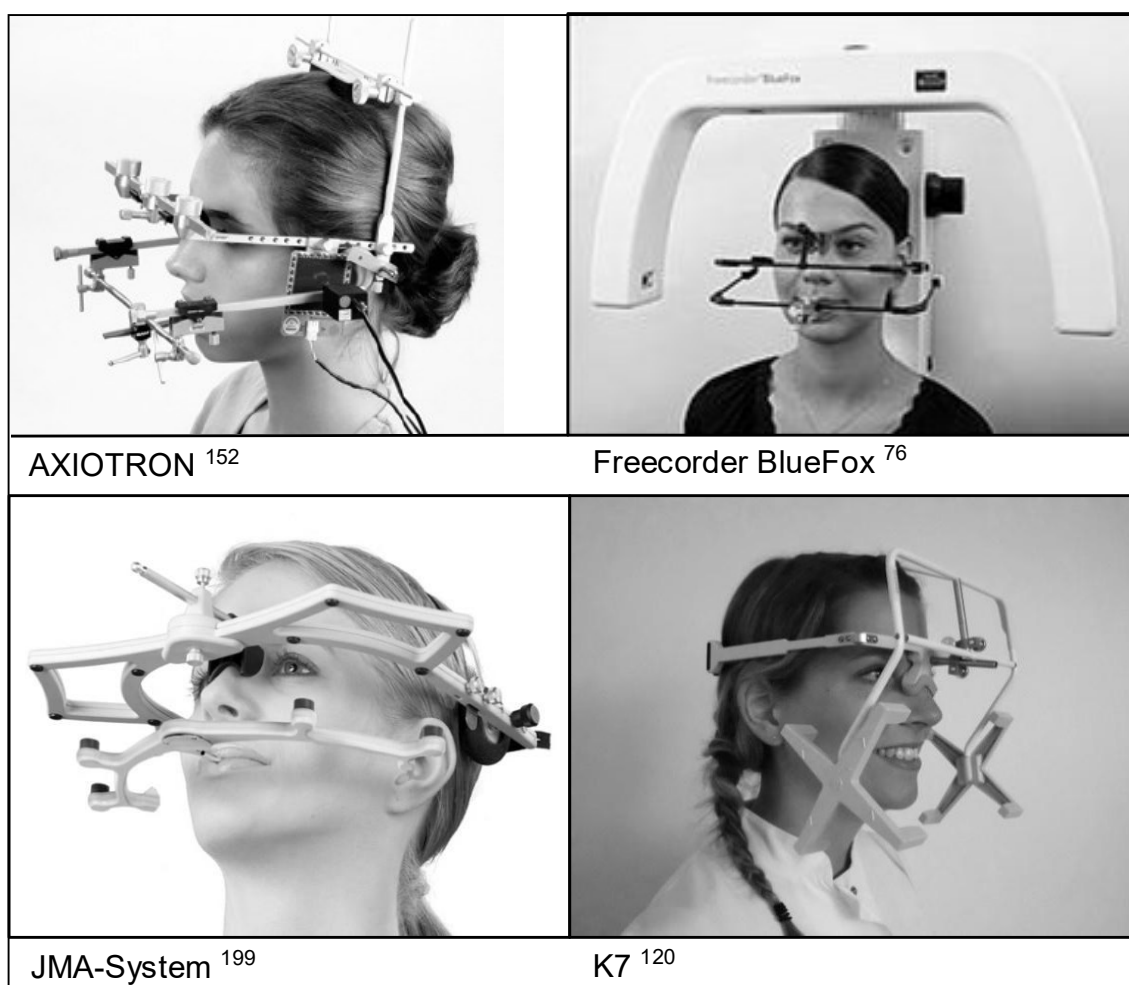
Gelenknah aufzeichnende Systeme	Gelenkfern aufzeichnende Systeme
AXIOGRAPH III	Kinematograph
SAS	JMA
AXIOTRON	AXIOQUICK-Recorder
CADIAX	ARCUS-digma
Freecorder BlueFox	Sirognathograph

**Tab. 1:** Beispiele für gelenknah und gelenkfern aufzeichnende elektronische Registriersysteme. Grau unterlegt: berührungslos aufzeichnende Messsysteme.

Bei den gelenknah arbeitenden Geräten werden die Messsensoren über Halte- und Registriervorrichtungen im Gelenkbereich platziert und eignen sich somit zur Aufzeichnung von Gelenkbahnen. Bei den gelenkfern aufzeichnenden Systemen erfolgt die Messung im Bereich der Zahnreihen. Die gelenkfern aufzeichnenden Geräte bieten durch das Registrieren von Bewegungen im Zahnbereich eindeutige Vorteile beim Messen von Kaubewegungen<sup>64</sup>. Einige neuere Systeme können auch als „gelenknah und gelenkfern aufzeichnend“ bezeichnet werden. Sie sind zwar anterior der Zahnreihen vor dem Gesicht des Patienten platziert und werden nicht nach der Scharnierachse ausgerichtet, sind aber in der Lage, Gelenkbewegungen zu registrieren.

Die Achsiographie stellt die klassische Methode zur Aufzeichnung von Unterkieferbewegungen dar und wird vor allem für den exakten Transfer der Bewegungsbahnen des Kiefergelenkes auf den Artikulator benutzt. Bei dieser Aufzeichnungsart sind an einem oberen Gesichtsbogen (am Schädel fixiert) zwei sagittal im Gelenkbereich positionierte Schreibplatten (Flaggen) angebracht. Schreibstifte, befestigt an einem unteren Gesichtsbogen (fixiert am Unterkiefer), stehen senkrecht auf den Schreibplatten und zeichnen beim Bewegen des Kiefers Spuren auf. So können die Scharnierachspunkte und sagittale Bewe-

gungsbahnen ermittelt werden, bei Kombination mit einer mechanischen Messuhr auch Bewegungen mit lateraler Komponente. Derzeit im Handel erhältliche Systeme, die sich dieser Methode bedienen, sind der AXIOTRON III und seine elektronische Version, das AXIOTRON (SAM Präzisionstechnik, D-Gauting) (Abb. 5)<sup>152</sup>. Auf diesem Prinzip basieren mehrere neuere Verfahren. Anstelle von Schreibplatten besitzt das AXIOTRON-System Sensorplatten zur Widerstandsmessung, ähnlich dem Touchpad eines Notebooks. Schreibstifte und Messuhren sind durch Sensoren zur Erfassung von Lageänderung und Winkeländerung (Inkrementalgeber) ersetzt<sup>103</sup>.



**Abb. 5:** Beispiele für elektronische Systeme zur Erfassung von Unterkieferbewegungen: Axiotron <sup>152</sup>, Freecorder BlueFox <sup>76</sup>, JMA <sup>199</sup> und K7 <sup>120</sup>.

Beim Freecorder BlueFox (Dentron, D-Höchberg) <sup>76</sup> erfolgt die Erfassung der Bewegungen über sogenanntes Muster-Tracking mit Spezialkameras, welche in das Gerät eingelassen sind, in dem der Patient positioniert wird (Abb. 5). Die erzielte Auflösung soll ausgesprochen hoch sein. Über einen paraokklusalen Registrierbehelf wird der aus dem Munde

ragende Messbügel am Unterkiefer angebracht. Auch eine paraokklusale Anbringung ist möglich. Das auf dem Unterkiefer lastende Gewicht wurde im Vergleich zu anderen Systemen weiter reduziert. Ein Karbon-Referenzbügel wird am Schädel durch Abstützung auf dem Nasenrücken und in den Gehörgängen befestigt. An den Enden dieser beiden Bügel befinden sich gelenknah Schwarz-Weiß-Muster. Durch Verfolgen der Muster sowohl am Unterkiefer- als auch am Referenzbügel können Kopfbewegungen herausgerechnet werden. Auch dieses System besitzt Funktionen zur Auswertung von Bewegungsbahnen, um Artikulatoren individuell zu justieren.

Das JMA der Fa. ZEBRIS (D-Isny im Allgäu) <sup>199</sup> verwendet die Methode der Laufzeitmessung von Ultraschallimpulsen. Die Empfängermodule sind in einen Gesichtsbogen integriert, ein gelenknah messender Unterkiefersensor (65 g) wird über einen paraokklusalen Löffel an der unteren Zahnreihe befestigt (Abb. 5). Zum Orientieren an einer Referenzebene enthält das System einen Taststift, mit dessen Hilfe z. B. die Achs-Orbitalebene eingegeben werden kann. Mit diesem System kann die Scharnierachse in zentrischer Kondylenposition oder als kinematische Achse aus Protrusions- und Öffnungsbewegungen bestimmt werden. Die Software WinJaw berechnet Artikulatoreinstellwerte sowie umfangreiche Funktionsparameter und ist zudem in der Lage eine neuromuskuläre zentrische Unterkieferposition zu bestimmen und Messverläufe in Echtzeit zu visualisieren. Nicht nur die Bewegungen im Gelenkbereich, sondern auch die des Inzisalpunktes werden aufgezeichnet. Mithilfe eines Rechenmoduls können weitere Details wie die palatinale Kontur der Frontzähne ermittelt werden. Das gleiche Prinzip nutzt auch der AXIOQUICK-Recorder, ein Produkt der Fa. SAM Präzisionstechnik (D-Gauting) sowie das ARCUSdigma der Fa. KaVo (D-Bieberach), folglich ist auch die Bauweise im Wesentlichen übereinstimmend. Das ARCUSdigma wird allerdings, im Gegensatz zu den beiden anderen Geräten, nicht nur mit einem Band um den Hinterkopf und einer Abstützung am Nasenrücken befestigt, sondern seine Lage wird zudem über Halterungen, die in die Gehörgänge gesetzt werden, gesichert <sup>76</sup>.

In der vorliegenden Studie soll die Magnetkinesiographieeinheit des K7 Evaluation System (Myotronics-Noromed, Inc., Kent, WA) <sup>89, 120</sup> zur Aufzeichnung der Unterkieferbewegungen genutzt werden (Abb. 5). Hierbei handelt es sich um ein vom Funktionsprinzip her dem „Sirognathograph“ (Fa. Siemens) entsprechendes Gerät, das Bewegungen des

Unterkiefers über einen definierten Punkt im Bereich der unteren Frontzähne dreidimensional aufzeichnet. Dazu wird ein kleiner Magnet mit einem Gewicht von 2 g an den Vorderflächen der unteren Schneidezähne des Probanden fixiert und ein leichter Registrierbogen (180 g), ähnlich einer übergroßen Brille, aufgesetzt. Dieser Bogen besitzt Magnetfeldsensoren, die Bewegungen des Magneten beim Kauen registrieren. Computergestützt werden die Bewegungsbahnen des Unterkiefers errechnet und zeitgleich auf einem Bildschirm dargestellt. Vorteile dieses Systems sind die einfache Handhabung, der mögliche Lippenchluss und das sehr geringe Gewicht, welches auf dem Unterkiefer lastet.

### 3 Material und Methode

#### 3.1 Der Kinesiograph des Registriersystems K7

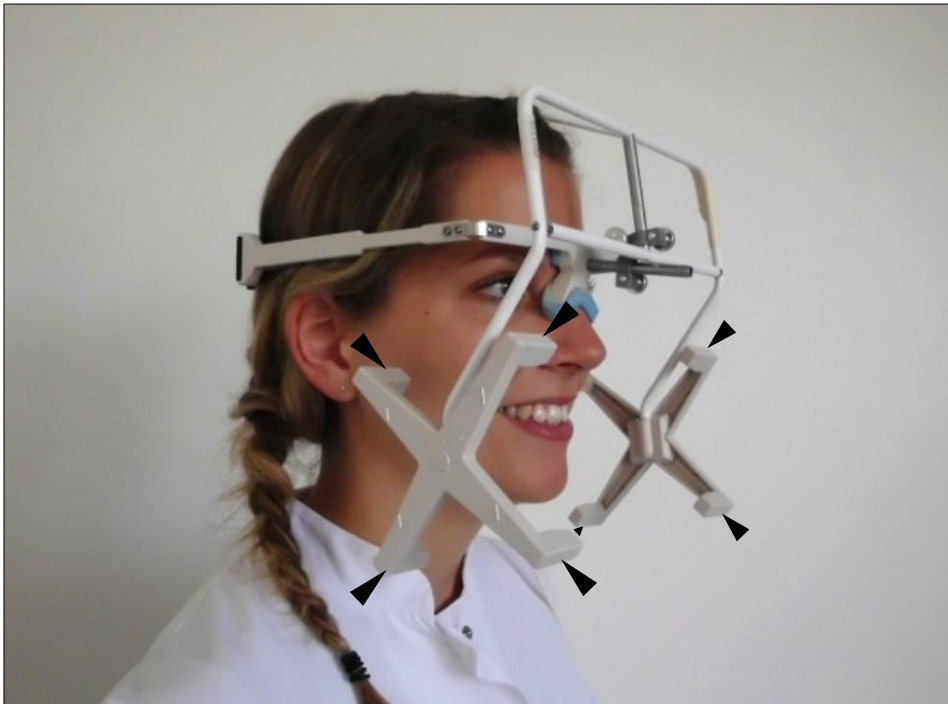
Der hier verwendete Kinesiograph des Registriersystems K7 (Fa. Myotronics-Noromed, Inc., Kent, WA) geht auf eine Entwicklung von LEWIN et al. zurück<sup>89</sup>. Er erfasst die Bewegungen eines definierten Unterkieferpunktes dreidimensional, berührungsfrei sowie in Echtzeit mit einer Genauigkeit von 0,1 mm. Als Signalgeber dient ein Permanentmagnet (Maße: 2 x 7 x 15 mm, Gewicht: 2 g; Abb. 6), der mithilfe eines leicht entfernbaren Adhäsivs (Stomahesive, Myotronics; Bestandteile: Sodium-Carboxymethyl-Zellulose, Gelatine, Pektin, Polyisbutylen, Mineralöl) in der Medianebene auf den Labialflächen der unteren Inzisiven befestigt wird.



**Abb. 6:** An den Unterkieferfrontzähnen befestigter Registriermagnet.

Zur Vermeidung von Registrierartefakten muss der Magnet so platziert werden, dass dieser bei zahngeführten Bewegungen nicht mit den Zähnen des Oberkiefers kollidiert. Alle Unterkieferbewegungen können somit störungsfrei ausgeführt werden. Zur korrekten Platzierung ist auch die Polarität des Magneten zu berücksichtigen. Hierfür ist an der Frontseite des Magneten der Nordpol markiert, die aus der Sicht des Patienten nach links zeigen

muss. Der Signalaufnehmer ist ein aus acht Magnetfeldsensoren bestehendes System, welches sich am schädelfixierten Registrierbogen befindet (Abb. 7).



**Abb. 7:** Registrierbogen. Die schwarzen Markierungen deuten auf die Magnetfeldsensoren.

Das Messprinzip des Sirognathographen beruht auf dem Hall-Effekt. Wird an ein als Hall-Sensor fungierendes Halbleiterplättchen in einem Magnetfeld ein Strom angelegt, führt dies zu einer durch die Lorenz-Kraft bedingten Elektronendichteabweichung. Der dadurch entstehende Elektronenüberschuss auf der einen, und Elektronenmangel auf der anderen Seite des Plättchens kann als elektrische Spannung gemessen werden. Änderungen der magnetischen Flussdichte, hervorgerufen durch Bewegung des Magneten im Raum, beeinflussen die Spannung. Diese Veränderungen werden registriert und in ein digitales Signal umgewandelt <sup>159</sup>.

Der Registrierbogen wird am Kopf des Probanden über eine Abstützung am Nasenrücken und ein im Bereich des Hinterkopfes liegendes elastisches Band fixiert, und so ausgerichtet, dass er parallel zur Bipupillarlinie orientiert ist. Während der Proband den Kopf aufrecht hält, werden die seitlichen Arme des Registrierbogens parallel zum Boden ausgerichtet. Hierbei ist zu beachten, dass das Gestell den Wangenbereich nicht berührt, um ein kaubedingtes Schwingen der Sensoren zu vermeiden. Anschließend erfolgt die computer-

gestützte Kalibrierung mithilfe einer speziellen Funktion der Software, bei der sowohl der Magnet als auch die Sensoren stilisiert dargestellt werden. So kann kontrolliert werden, ob sich der Magnet im Mittelpunkt des zentralen Messfeldes befindet. Ist dies nicht der Fall, erfolgt die Korrektur mithilfe der Justierschrauben des Registrierbogens. Mit Bestätigung der korrekten Ausrichtung wird die zu diesem Zeitpunkt bestehende Position des Magneten und damit des Unterkiefers zum Nullpunkt (Referenzpunkt) für die nachfolgenden Bewegungsaufzeichnungen.

Um Bewegungen des Kopfes während der Messungen zur Vermeidung von Aufzeichnungsartefakten gering zu halten, wurden die Versuchspersonen angewiesen, einen Punkt an der Wand des Untersuchungsraumes zu fixieren. Diese Orientierungsmarke war in 1,5 m Entfernung frontal in Augenhöhe des Probanden platziert.

Die Bewegungen der Mandibula werden in Näherung als dreidimensionale Bewegung des Inzisalpunktes (Approximalkontakt der beiden zentralen unteren Inzisiven) computergestützt registriert und auf dem PC-Bildschirm in Echtzeit wiedergegeben (Abb. 8-10).

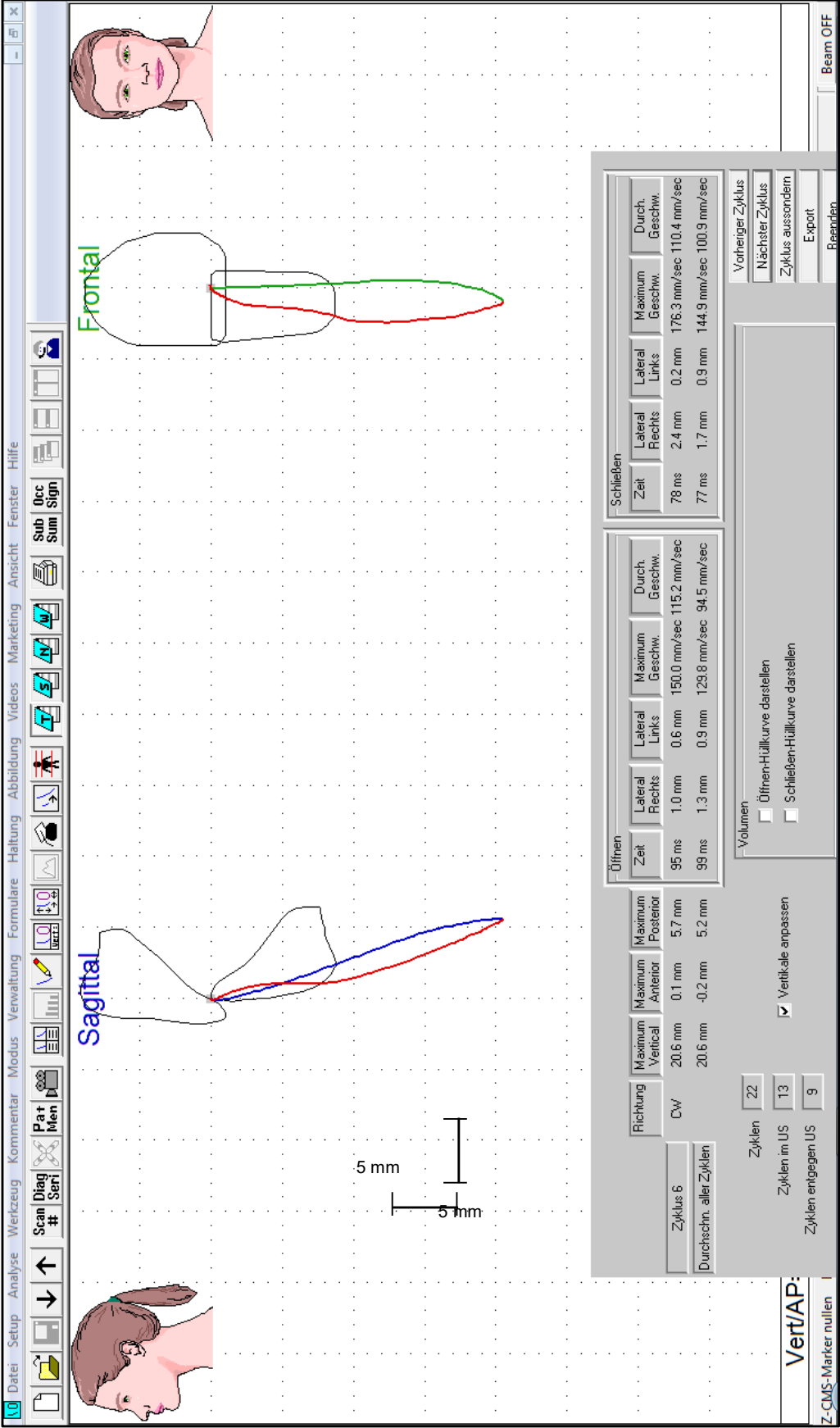
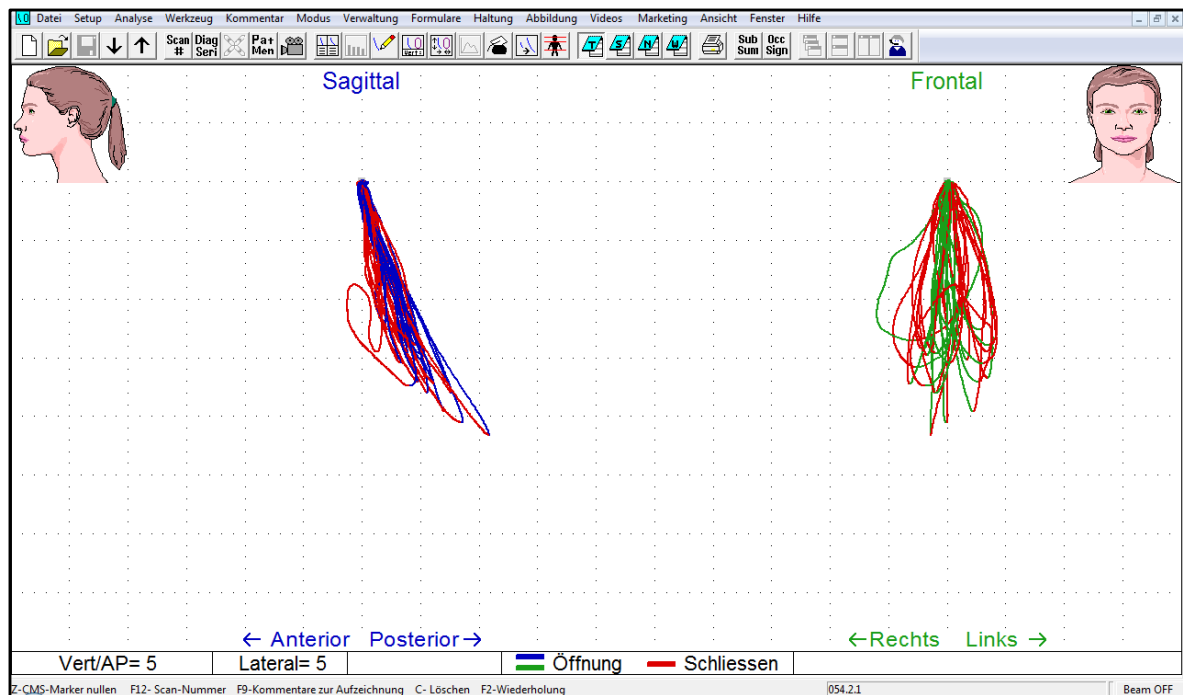
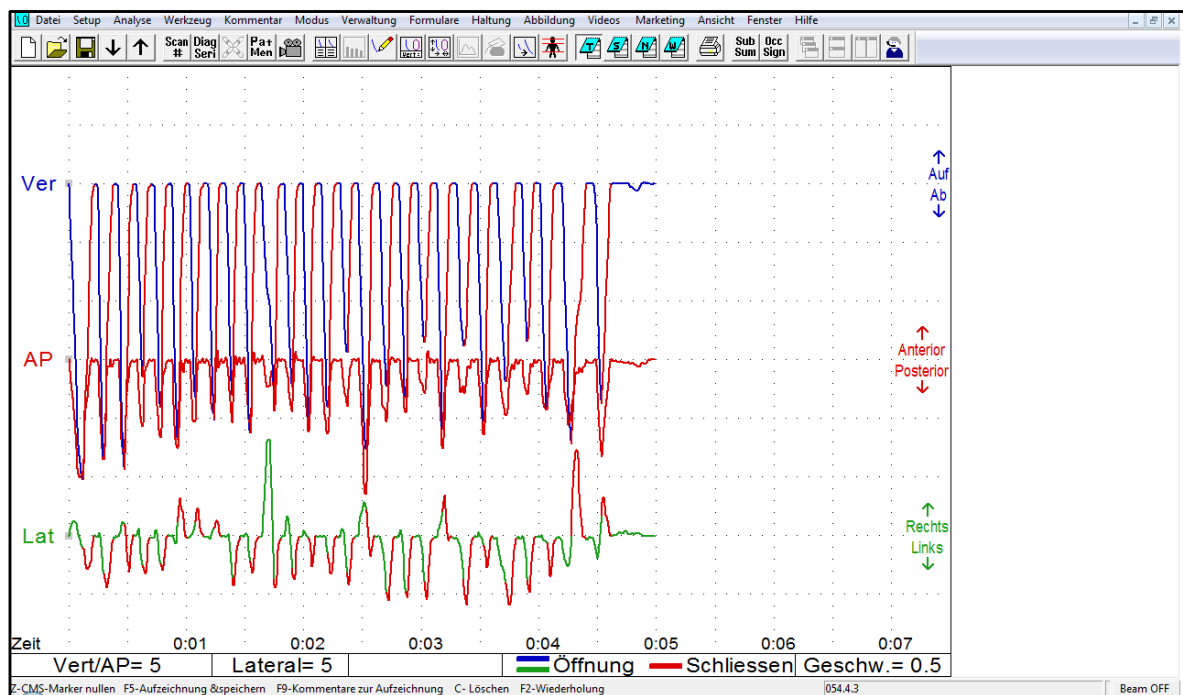


Abb. 8: Einzelner Kauzyklus mit stilisiert dargestellten Frontzähnen. Blaue Spur: Öffnungsbewegung des Inzisalpunktes in der Sagittalebene; grüne Spur: Öffnungsbewegung in der Frontalebene; rote Spur: Schließbewegung in den beiden Ebenen. Der graue Analysekasten zeigt die einzelnen Messwerte an.





**Abb. 9:** Darstellung einer gesamten Kausequenz mit einer Vielzahl von Kauzyklen von der Aufnahme des Speisebolus bis zum Schlucken. Die Darstellungen im Modus „sagittal/frontal“ verdeutlichen das Bewegungsausmaß.



**Abb. 10:** Darstellung einer gesamten Kausequenz über die Funktion der Zeit. Jeder Ausschlag stellt einen Kauzyklus dar. Ver: Darstellung des vertikalen Bewegungsausmaßes; AP: Darstellung des sagittalen Bewegungsausmaßes (anterior-posterior); Lat: Darstellung des lateralen Bewegungsausmaßes.

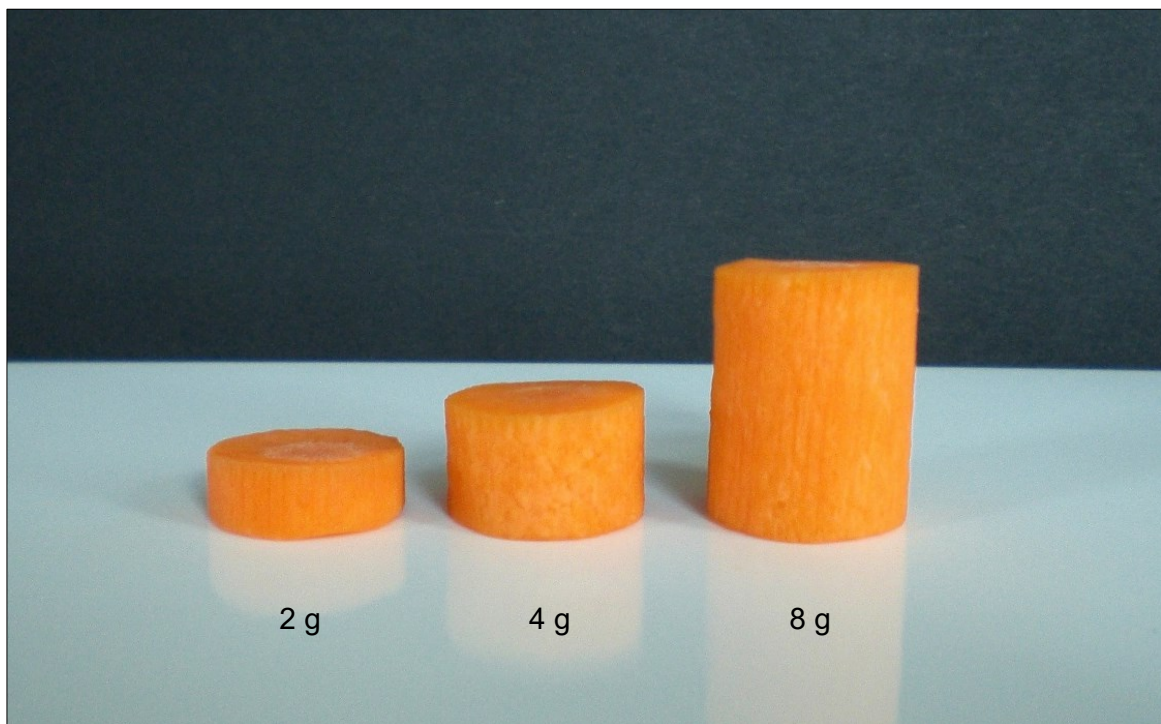
Die Hardware des K7-Sirognatographen besteht aus dem Registrierbogen mit Magnet, der K7-Registriereinheit, sowie dem Computer (OPTIPLEX 755 mit Intel Core 2 Duo Inside) sowie einem Bildschirm der (Fa. Dell, geprüft). Bei der Messsoftware handelte es sich um eine extra für diese Studie erweiterte K7-Evaluationssoftware Version 10.01 (G-German Myotronics-Noromed, Inc., Kent, USA). Vorversuche zur Methodik zeigten, dass die handelsübliche K7-Software zur Auswertung von Kauvorgängen nicht geeignet war. Auf den Ergebnissen der Vorversuche basierend, wurde in enger Kooperation mit der IT-Abteilung der Fa. Myotronics-Noromed die Software um Module zur Erfassung von mastikatorischen Unterkiefer-Bewegungen ergänzt. So erlaubt die handelsübliche Software nun folgende zusätzliche Funktionen:

- eindeutige Differenzierung jedes einzelnen Kauzyklus
- für jeden einzelnen Kauzyklus Aufzeichnung von
  - maximaler Mundöffnung in vertikaler Richtung
  - maximale Bewegung nach anterior und posterior
  - maximales Bewegungsausmaß nach rechts und links, sowohl beim Öffnen als auch beim Schließen
  - Dauer der Öffnungsbewegung, Dauer der Schließbewegung
  - Maximale sowie durchschnittliche Geschwindigkeit sowohl der Öffnungs- als auch der Schließbewegung
  - Angabe der Richtung: Angabe, ob im oder gegen den Uhrzeigersinn (vom Betrachter aus) gekaut wurde. Dies lässt Rückschlüsse auf die Kauseite zu.
- Kontrolle jedes einzelnen Kauvorgangs und jedes Kauzyklus, wodurch eventuelle Fehler bei Aufzeichnung angezeigt werden können
- Berechnung einer Hüllkurve zur Darstellung des Bewegungsfeldes sowohl beim Öffnen als auch beim Schließen des Mundes
- verbesserte Exportoptionen zum Transfer der Daten in das Microsoft Excel-Programm für die anschließende statistische Weiterverarbeitung.

### 3.2 Wahl des Kaugutes

In Vorversuchen mit verschiedenen Arten von Kaugut wurde deutlich, dass sich Karotten aus folgenden Gründen besonders gut für Kaustudien eignen: Sie lassen sich gut portionieren, sind von konstanter Konsistenz, bieten ausreichend Kauwiderstand, kleben nicht, rufen äußerst selten allergische Reaktionen hervor, stellen ein natürliches Kaugut dar und schmecken fast jedem. Zudem ist ihre Zerkleinerung wenig von der individuellen Speichelmenge abhängig, da sie während des Kauvorganges praktisch keine Flüssigkeit aufnehmen.

Außerdem ergaben die Versuche, dass eine Charakterisierung der Kaugutmenge nach Gewicht exakt und praktikabel ist, und Untersuchungen mit Portionen von zwei, vier und acht Gramm physiologisch und sinnvoll sind (Abb. 11).



**Abb. 11:** Karottenstücke definierten Gewichts: 2 g, 4 g, 8 g. Daraus resultierten Stücken der Größen 2 cm x 0,7 cm, 2 cm x 1,4 cm und 2 cm x 2,8 cm bzw. mit Volumina von 2,2 cm<sup>3</sup>, 4,4 cm<sup>3</sup> und 8,8 cm<sup>3</sup>. Die Formgebung erfolgte mithilfe eines handelsüblichen Apfelausstechers.

### 3.3 Ethikvotum und Probandenkollektiv

Für diese Studie liegt unter der Studiennummer 69/12 ein positives Ethikvotum des Fachbereichs 20 der Philipps-Universität Marburg vor. Die angegebene Studie fand in der Zeit von Dezember 2012 bis Mai 2013 statt.

Das Probandenkollektiv setzte sich aus 53 jungen, vollbezahnten Personen im Alter von 20-30 Jahren zusammen, davon waren 37 Frauen (70%) und 16 Männer (30%). Alle Probanden erklärten sich freiwillig zur Teilnahme am Versuch bereit.

Die für den Ethikantrag durchgeführte Fallzahlberechnung ergab eine erforderliche Fallzahl von 30 Probanden <sup>5, 12, 66, 86, 87, 111, 138, 191</sup>. Im Rahmen der Poweranalyse wurden als primäre Endpunkte der Studie die Anzahl der Kauzyklen während einer Kausequenz sowie die vertikale Amplitude (maximale Mundöffnung) beim Kauen definiert. Die Berechnung der Fallzahlen erfolgte mit BiAS für Windows (epsilon Verlag, Frankfurt) Version 9.1.

Alle Probanden erfüllten folgende Einschlusskriterien:

- Alter zwischen 20 und 30 Jahren
- maximale und stabile Interkuspidation
- Vollbezahnung einschließlich der ersten und zweiten Molaren, dabei Versorgung mit festsitzendem Zahnersatz möglich (jedoch ohne Brücken)
- geschlossene Zahnreihe (durchgehend vorhandene Approximalkontakte)
- initiale oder verzögerte Front-/Eckzahnführung
- (abgeschlossene) kieferorthopädische Behandlung möglich
- funktionsgesund (d. h. keine Einschränkungen oder Schmerzen bei der Kiefer- bzw. Kaubewegung)

Als Ausschlusskriterien galten:

- dominierende Kontakte auf der Laterotrusions- und Mediotrusionsseite
- Deckbiss, Kopfbiss oder lateraler Zwangsbiss
- ausgeprägtes Abrasionsgebiss auf Inzisalkanten und Palatinalflächen
- skelettale, artikuläre oder muskuläre Störungen im Kopf und Nackenbereich
- akute dentale, parodontale Erkrankungen oder schmerzhafte Mundschleimhauterkrankungen
- bekannte Allergie oder Kreuzallergie auf rohe Karotten

Die Stichprobe repräsentierte somit eine junge, gesunde Bevölkerungsgruppe (Grundgesamtheit) ohne Einschränkungen der Mundgesundheit im Alter von etwa 20 bis 30 Jahren. Die Mehrheit der Probanden waren Studierende der Philipps-Universität Marburg.

Jedem Probanden wurde zur Pseudonymisierung ein Code zugeordnet, indem ihnen jeweils eine Zahl von 001 bis 100 zugelost wurde, eine Mehrfachziehung war dabei ausgeschlossen. Die Speicherung und Verwendung der aufgezeichneten Daten erfolgte anschließend ausschließlich unter dieser Codenummer. Auf dem klinischen Untersuchungsbogen wurde Codenummer, Geburtsjahr und Geschlecht des Probanden sowie das Untersuchungsdatum vermerkt. Die mit dem K7-System aufgezeichneten Daten wurden unter der Codenummer und dem Untersuchungsdatum gespeichert. Die Liste zur Decodierung wird vom Leiter der Studie unter Verschluss gehalten.

In einer etwa zwanzigminütigen Voruntersuchung wurden die für die Studie geeigneten Probanden ausgewählt und deren Alter, Geschlecht, Gebisszustand sowie Funktion der Kaumuskulatur und Kiefergelenke dokumentiert. Dazu inspizierte der Untersucher optisch Zähne und angrenzende Weichgewebe jedes potenziellen Probanden und erhob eine allgemeine und spezielle Anamnese. Als Leitfaden und zur Dokumentation der Befunde diente ein modifizierter Untersuchungsbogen (siehe Anhang). Besonderer Wert wurde bei der Voruntersuchung der potenziellen Probanden auf die „Einschlusskriterien“ und „Ausschlusskriterien“ gelegt.

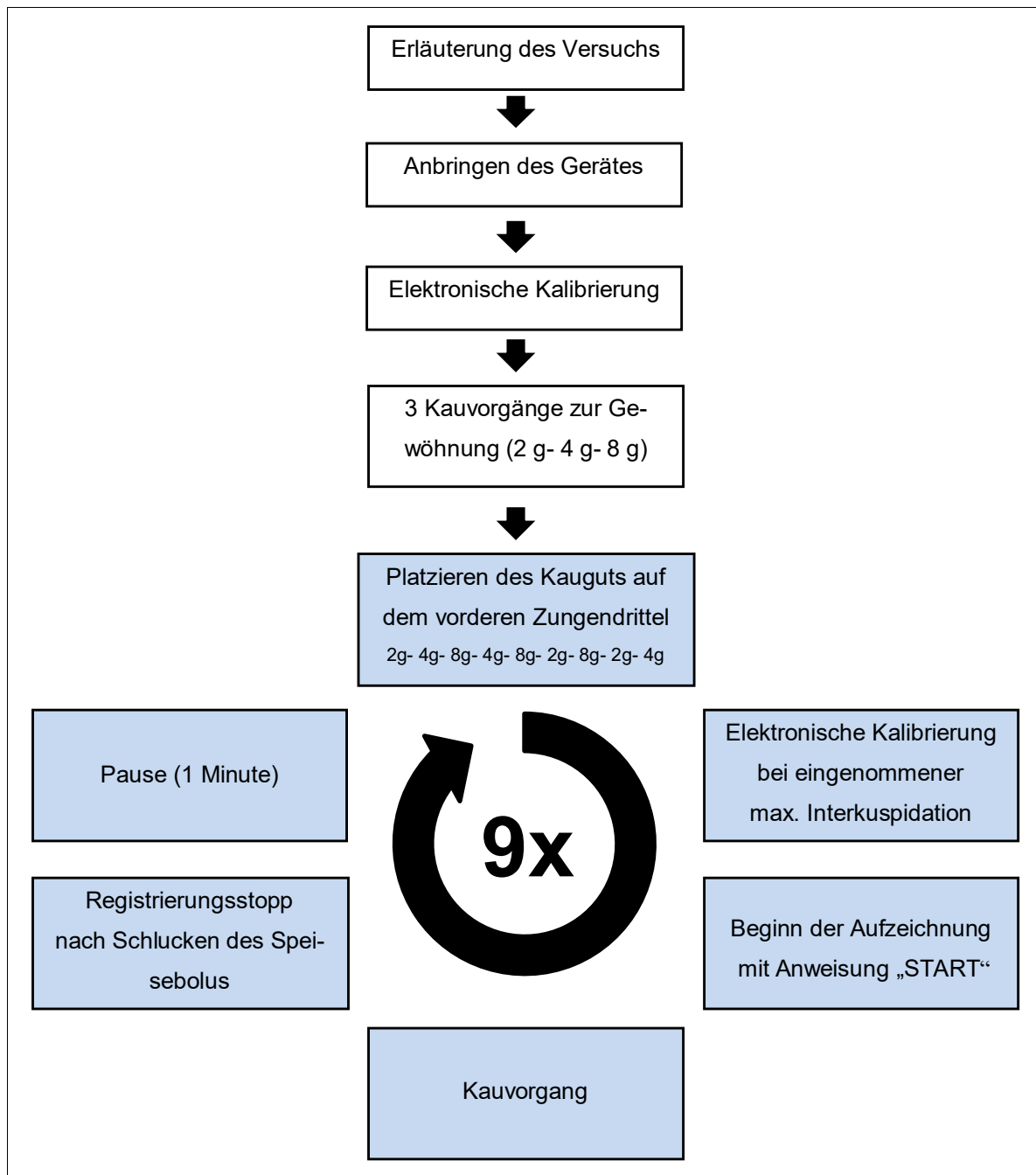
Im Anschluss an die Voruntersuchung gaben die Probanden ihr schriftliches Einverständnis zur Teilnahme an der Studie.

### **3.4 Versuchsablauf**

Alle Versuche fanden in einem Untersuchungsraum der Zahnklinik Marburg statt. Voraussetzung für die Versuchsdurchführung war, dass der Proband sich wach und belastbar fühlte und weder ein Hunger- noch ein Sättigungsgefühl verspürte.

Der Versuchsablauf (Abb. 12) wurde dem Probanden zunächst im Detail erläutert. Er wurde aufgefordert, während der Versuchsdurchführung in gerader Blickrichtung an ein in

Augenhöhe angebrachtes Kreuz zu schauen. Dies sollte stärkere Kopfbewegungen während der Messung verhindern und ein möglichst artefaktfreies Aufzeichnen ermöglichen.



**Abb. 12:** Ablaufschema. Mit jedem Probanden begann der Versuch mit der Erläuterung des Ablaufes, Positionierung und Kalibrierung des Gerätes und Probekautvorgängen (weiß hinterlegte Kästen). Anschließend folgten neun Kaudurchgänge, in denen die Messdaten für die spätere Auswertung aufgezeichnet wurden (blau hinterlegte Kästen).

Stressoren können als Einflussfaktoren das Kaumuster verändern. Es wurde daher der Eindruck einer Prüfungssituation sowie Termindruck vermieden. Die Untersuchungen erfolgten in ruhiger und entspannter Atmosphäre.

Für den Versuch saß der Proband aufrecht auf einem Stuhl. Das K7-System wurde an seinem Kopf angebracht, kalibriert und in der Software Scan 8 mit Modus sagittal/frontaler Darstellungsweise ausgewählt.

Dem Probanden wurde das Kaugut (ein Karottenstück mit einem Gewicht von 2 g, 4 g oder 8 g) mithilfe einer Pinzette auf das vordere Zungendrittel gelegt. Er schloss den Mund und brachte seine Zähne in maximalen Kontakt (maximale Interkuspidation).

Der Untersucher gab dem Probanden mit dem Wort „START“ die Anweisung zum Kauen und drückte gleichzeitig die Aufnahmetaste.

Nachdem der Proband das Kaugut geschluckt hatte, drückte der Untersucher erneut die Aufnahmetaste, um die Aufzeichnung zu stoppen.

Um den Probanden mit dem Registriervorgang vertraut zu machen, begann der Versuch mit drei Kausequenzen, deren Daten nicht in die Auswertung einfließen.

Da die vorhergegangene Kaugutmenge sich möglicherweise auf die folgende Kausequenz auswirkt <sup>164</sup>, wurde die Reihenfolge der verwendeten Kaugutmengen wie folgt variiert: 2 g, 4 g, 8 g, 4 g, 8 g, 2 g, 8 g, 2 g, 4 g.

Zwischen den einzelnen Aufzeichnungen wurde jeweils eine Pause von einer Minute eingehalten, während der es dem Probanden erlaubt war, zu sprechen und zu trinken. Zur Qualitätssicherung der Registrierung erfolgte vor jeder Messung eine erneute elektronische Kalibrierung.

### 3.5 Statistische Aufbereitung der Messdaten

Die Messgrößen zur Auswertung der Charakteristik der Kausequenzen sind Anzahl der Kauzyklen, Amplituden der Unterkieferbewegung in Vertikal-, Transversal- und Sagittalebene, Geschwindigkeit und Richtung der Kieferbewegungen sowie Dauer einer Kausequenz (Tab. 2 und 3).

Messgröße	Beschreibung	Skalenniveau	Einheit
Anzahl	Anzahl der Kauzyklen	ordinal	
Amplitude	Max. Mundöffnung während einer Kausequenz	metrisch	mm

**Tab. 2:** Als primäre Zielgrößen der Untersuchung definierte Messgrößen. „Anzahl“ (der Kauzyklen) und „Amplitude“ (der Mundöffnung) tabellarisch dargestellt mit Skalenniveau und Einheit.

Messgröße	Beschreibung	Skalenniveau	Einheit
Geschwindigkeit	Geschwindigkeit der Öffnungsbewegung	metrisch	mm/s
Dauer	Dauer einer Kausequenz	metrisch	sek
Geschwindigkeit	Anzahl der Kauzyklen pro Minute	metrisch	mm/s
Amplitude	Abweichung von der Mittellinie nach rechts und links	metrisch	mm
Amplitude	Bewegung des Inzisalpunktes nach anterior und posterior	metrisch	mm
Richtung	Im Uhrzeigersinn/gegen den Uhrzeigersinn	dichotom	

**Tab. 3:** Tabellarische Darstellung der als sekundäre Zielgrößen der Untersuchung definierten Messgrößen mit Skalenniveau und Einheit.

Je Kaugutmenge wurden drei Durchgänge aufgenommen und die dazugehörigen Messwerte im Anschluss gemittelt. Es handelte sich bei den hier untersuchten Größen um quantitative Parameter, die anhand von Mittelwert und Standardabweichung, Minimum und Maximum sowie den Quartilen inklusive Median beschreibend dargestellt und mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test auf Normalverteilung geprüft wurden. Bei signifikanter Abweichung von einer Normalverteilung erfolgte der Vergleich der drei Kaugutmengen als verbundene Beobachtungen mit dem Friedman-Test und sich anschließenden Wilcoxon-Tests für Paardifferenzen bei signifikantem Globaleffekt. Konnte keine signifikante Abweichung von einer Normalverteilung nachgewiesen werden, wurde eine Varianzanalyse für Messwiederholungen eingesetzt, um die Kaugutmengen zunächst global hinsichtlich der jeweiligen Parameter zu vergleichen. Es folgten die Berechnungen linearer Kontraste,



falls ein signifikanter Globaleffekt zu verzeichnen war. Anhand von Boxplots wurden die hier untersuchten Parameter in Abhängigkeit der Kaugutmengen grafisch dargestellt. Zu den ordinal und nominal skalierten Größen wurden absolute und prozentuale Häufigkeiten zur Verteilungsbeschreibung angegeben.

Es wurde stets zweiseitig getestet und ein Signifikanzniveau von 5% zugrunde gelegt. Primäre Zielparameter waren die Anzahl der Kauzyklen, die deskriptiv für die drei Kaugutmengen gegenübergestellt wurden und die maximale Mundöffnung, die mittels ANOVA für Messwiederholungen analysiert wurde. Die signifikanten Effekte, die sich bei diesem Parameter durch den Vergleich der Kaugutmengen zeigten, hielten einer Adjustierung für multiples Testen nach Bonferroni und Holm stand, für alle weiteren sekundären Zielparameter erfolgte keine Adjustierung für multiples Testen, diese Ergebnisse haben dementsprechend beschreibenden und explorativen Charakter. Für die Durchführung der statistischen Berechnungen wurde IBM SPSS Statistics 21 (SPSS Inc. an IBM Company, Chicago, IL) eingesetzt.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Probandenkollektiv

Insgesamt konnten die Daten von 53 untersuchten Probanden in die Auswertungen einfließen, davon waren 16 Männer und 36 Frauen im Alter von 20-30 Jahren. Das Durchschnittsalter betrug bei beiden Geschlechtern 25 Jahre.

Nach Durchführung des Versuches wurden die Probanden zu ihren Eindrücken und Erfahrungen beim Kautest befragt. Relevante Angaben waren:

- Ich habe mir (unabsichtlich) Mühe gegeben.
- Ich hatte die Befürchtung, dass sich der Magnet während des Kauens lösen könnte
- Das Registriersystem führte zu einer gewissen Beeinflussung des Empfindens, zum Beispiel erschwerter Mundschluss und verstärkte Wahrnehmung des Musculus temporalis durch das am Kopf liegende Befestigungsband.
- Gelegentlich verwechselte ich den Magneten mit einem Stückchen Karotte, dies führte zu unnötigen „Säuberungsbewegungen“.
- Kauen im Untersuchungsraum unterscheidet sich vom Kauen an gewöhnlichen Orten der Nahrungsaufnahme.
- Es fehlte das oft zum Essen gehörenden Abbeißen.
- Das Karottenstück der Größe 8 g war recht groß.
- Mein Kaumuster wurde durch ein vorausgegangenes Ereignis geprägt (Zahnextraktion, Läsionen → Angewöhnung eines neuen Kaumusters, zum Teil mit neuer Kauseitenpräferenz).

## 4.2 Anzahl der Kauzyklen bei unterschiedlichen Kaugutmengen

Die Anzahl der Kauzyklen hing von der Kaugutmenge ab (Tab. 4). Mit steigender Kaugutmenge nahm ihre Anzahl zu: 21,8 Kauzyklen bei 2 g (SA 7,7), 28,0 bei 4 g (SA 7,1), 38,1 bei 8 g (SA 7,9). Damit wurde bei einer Kaugutmenge von 4 g im Verhältnis zu einer Kaugutmenge von 2 g 1,4-mal mehr gekaut (SA 0,17), bei einer Verdopplung der Kaugutmenge von 4 g auf 8 g wurden 1,5-mal mehr Kauzyklen ausgeführt (SA 0,18) (Tab. 5).

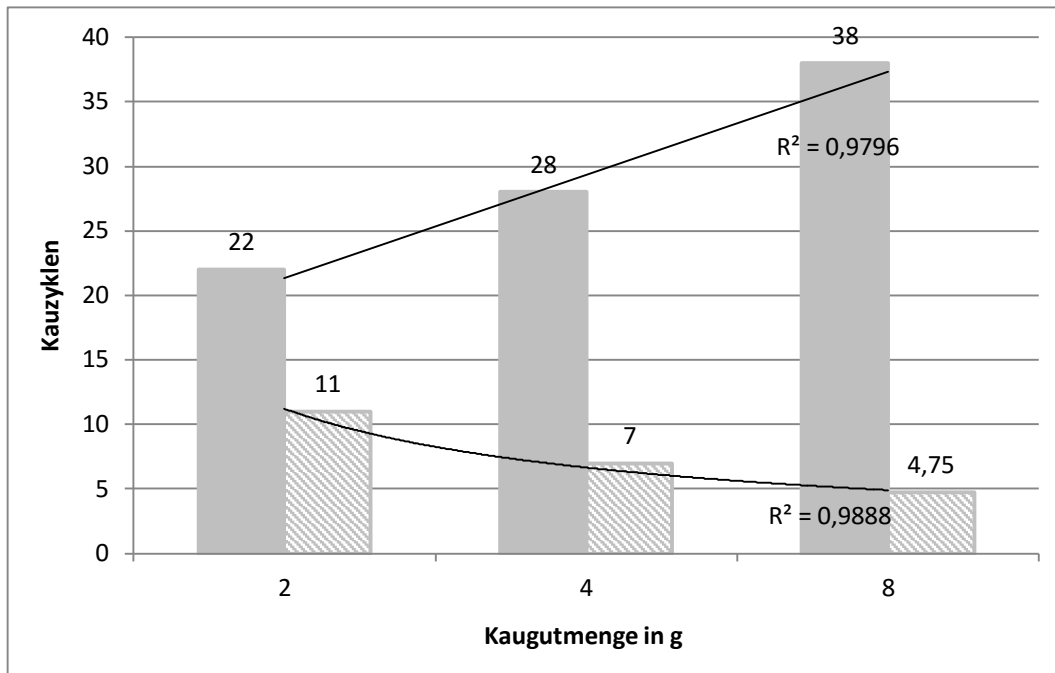
Anzahl der Kauzyklen	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum	Perzentile		
						25.	50. (Median)	75.
bei KGM 2 g	53	21,8	7,7	11,7	43,0	16,2	20,0	25,3
bei KGM 4 g	50	28,0	7,1	13,7	44,3	23,0	27,2	31,8
bei KGM 8 g	42	38,1	7,9	17,0	53,3	34,0	38,2	44,4

**Tab. 4:** Anzahl der Kauzyklen bei Kaugutmenge (KGM) 2 g, 4 g und 8 g. Die mittlere Kauzyklenzahl einer Kausequenz (Mittelwert), die minimale und maximale Anzahl (Minimum, Maximum) sowie der Median wurden berechnet. Die Zahl der Probanden (N) differiert, da aufgrund unvollständiger Aufzeichnung nicht alle Zyklen einbezogen werden konnten. Werte gerundet.

Verhältnis der Anzahl der Kauzyklen	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum	Perzentile		
						25.	50. (Median)	75.
bei KGM 4 g zu 2 g	50	1,4	,17	1,00	1,81	1,25	1,36	1,51
bei KGM 8 g zu 2 g	42	2,1	,30	1,42	2,67	1,94	2,09	2,27
bei KGM 8 g zu 4 g	42	1,5	,18	1,24	2,13	1,35	1,48	1,59

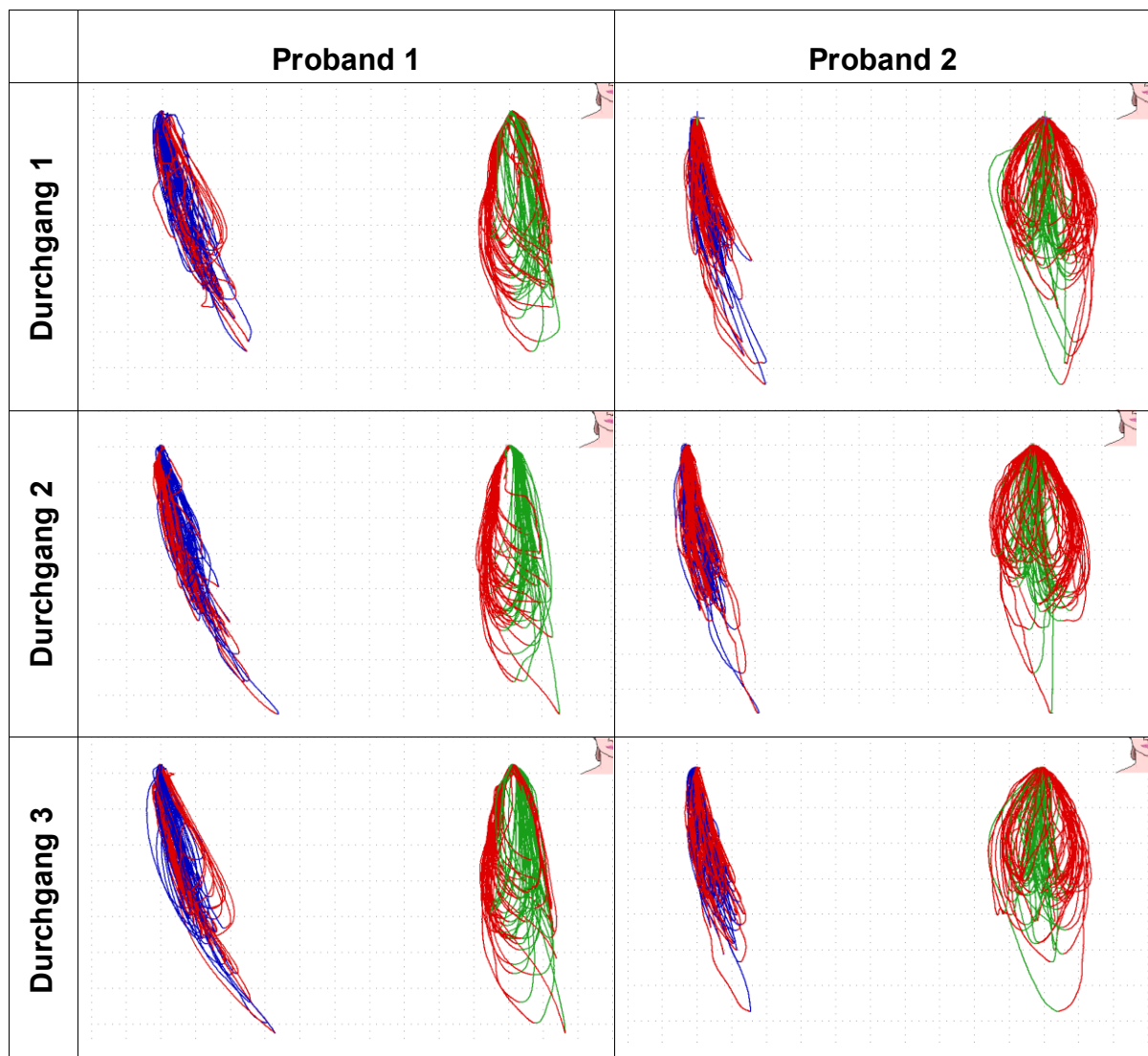
**Tab. 5:** Verhältnisse zwischen der Anzahl von Kauzyklen bei unterschiedlichen Kaugutmengen (KGM). Dargestellt sind die Faktoren (Mittelwert), um die sich die Kauzyklenzahl von kleinerer zu größerer Kaugutmenge vervielfacht. Die Zahl der Probanden (N) differiert, da aufgrund unvollständiger Aufzeichnung nicht alle Zyklen einbezogen werden konnten. Werte gerundet.

Dass somit die Kauzyklenzahl pro ein Gramm Kaugut abnahm, verdeutlicht Abb. 13. Bei Betrachtung des Verhältnisses der Anzahl der Kauzyklen zwischen Kaugutmenge 8 g und 2 g wird ersichtlich, dass sich bei dieser Vervierfachung der Kaugutmenge die Kauzyklenzahl annähernd verdoppelte (Faktor 2,1; SA 0,3).

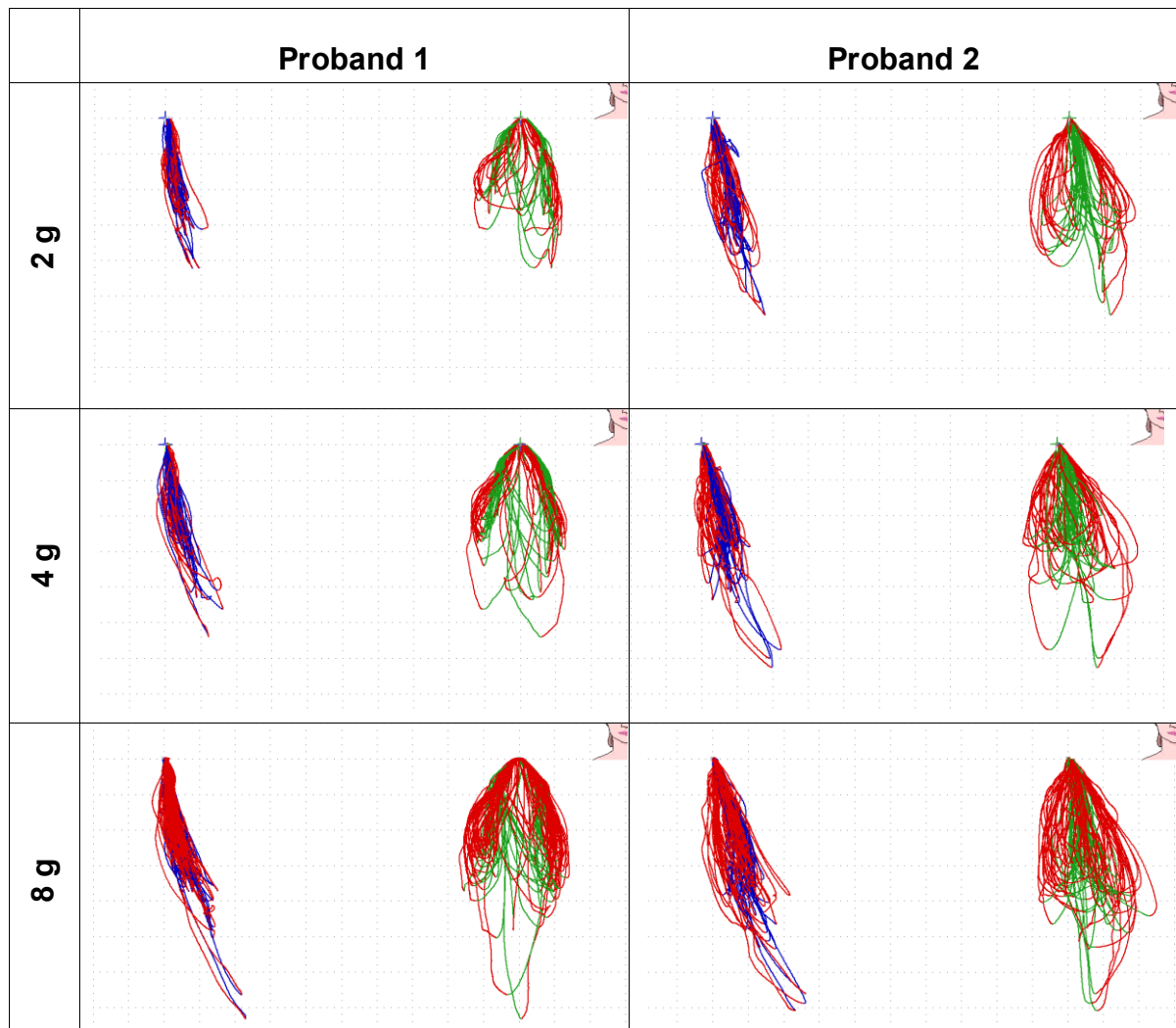


**Abb. 13:** Zunahme der Kauzyklen bei steigender Kaugutmenge und Abnahme der Kauzyklen pro ein Gramm Kaugut bei steigender Kaugutmenge. Durch die Werte sind lineare bzw. potenzielle Trendlinien gelegt. Die einfarbigen Säulen zeigen die Steigerung der Kauzyklen mit der Kaugutmenge (Zunahme: 6 Zyklen von 2 g auf 4 g, 10 Zyklen von 4 g auf 8 g), die schraffierten Säulen verdeutlichen die sinkende Zahl von Kauzyklen pro ein Gramm Kaugut bei steigender Kaugutmenge.  $R^2$  ist das Bestimmtheitsmaß der Trendlinie.

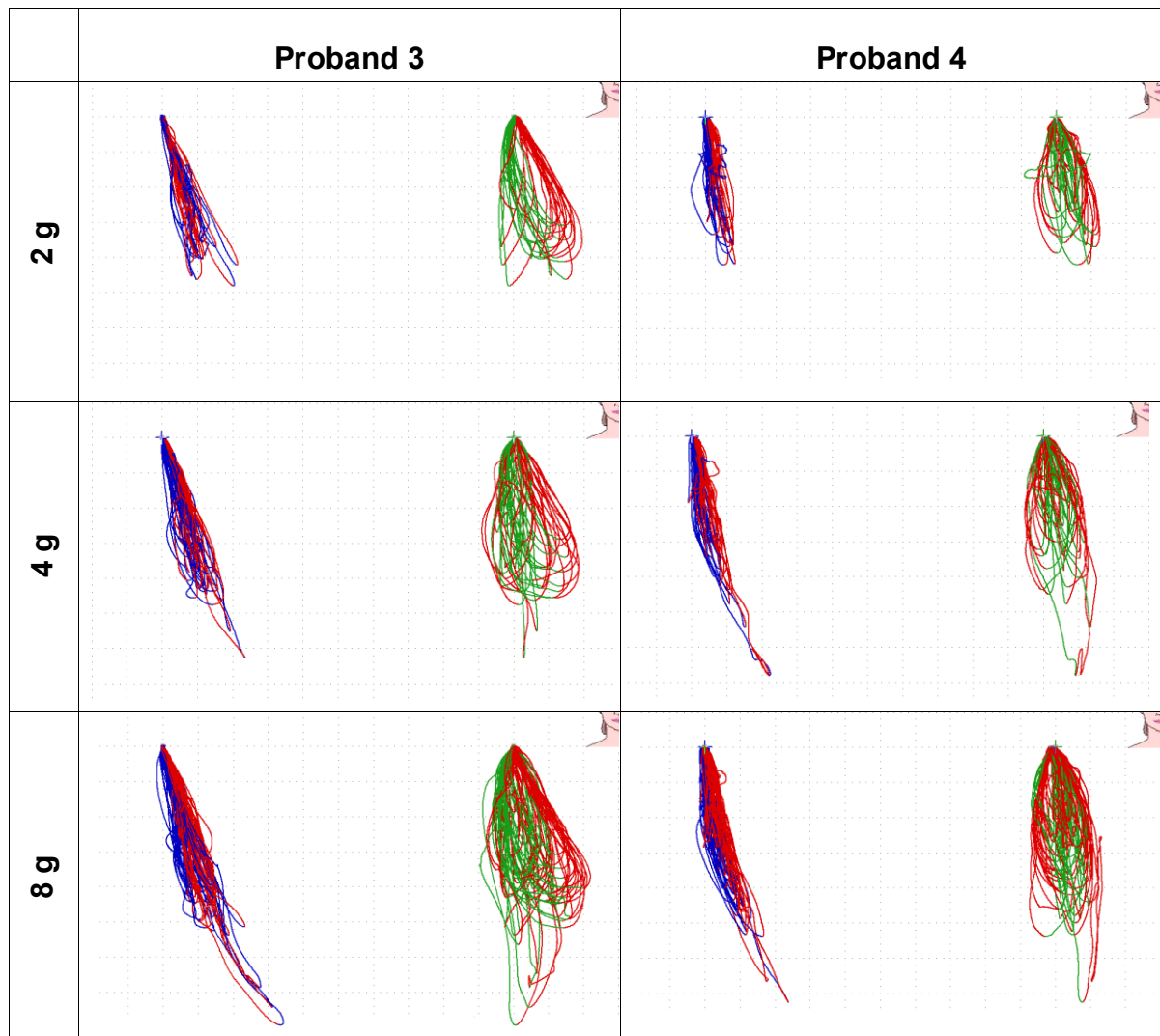
Die graphische Darstellung einer Kausequenz von Kaubeginn bis zum Schlucken illustriert das Kaumuster. Die Abb. 14-17 zeigen exemplarisch typische Kaumuster für die drei Versuchsdurchgänge sowie für die Kaugutmengen 2, 4 und 8 g. Jeder Proband besaß ein individuelles, charakteristisches Kaumuster. Die Muster der verschiedenen Durchgänge ähnelten sich. Allein der visuelle Vergleich der in Abb. 14 dargestellten Kaumuster macht deutlich, dass die Probanden ein charakteristisches und reproduzierbares Kaumuster besitzen.



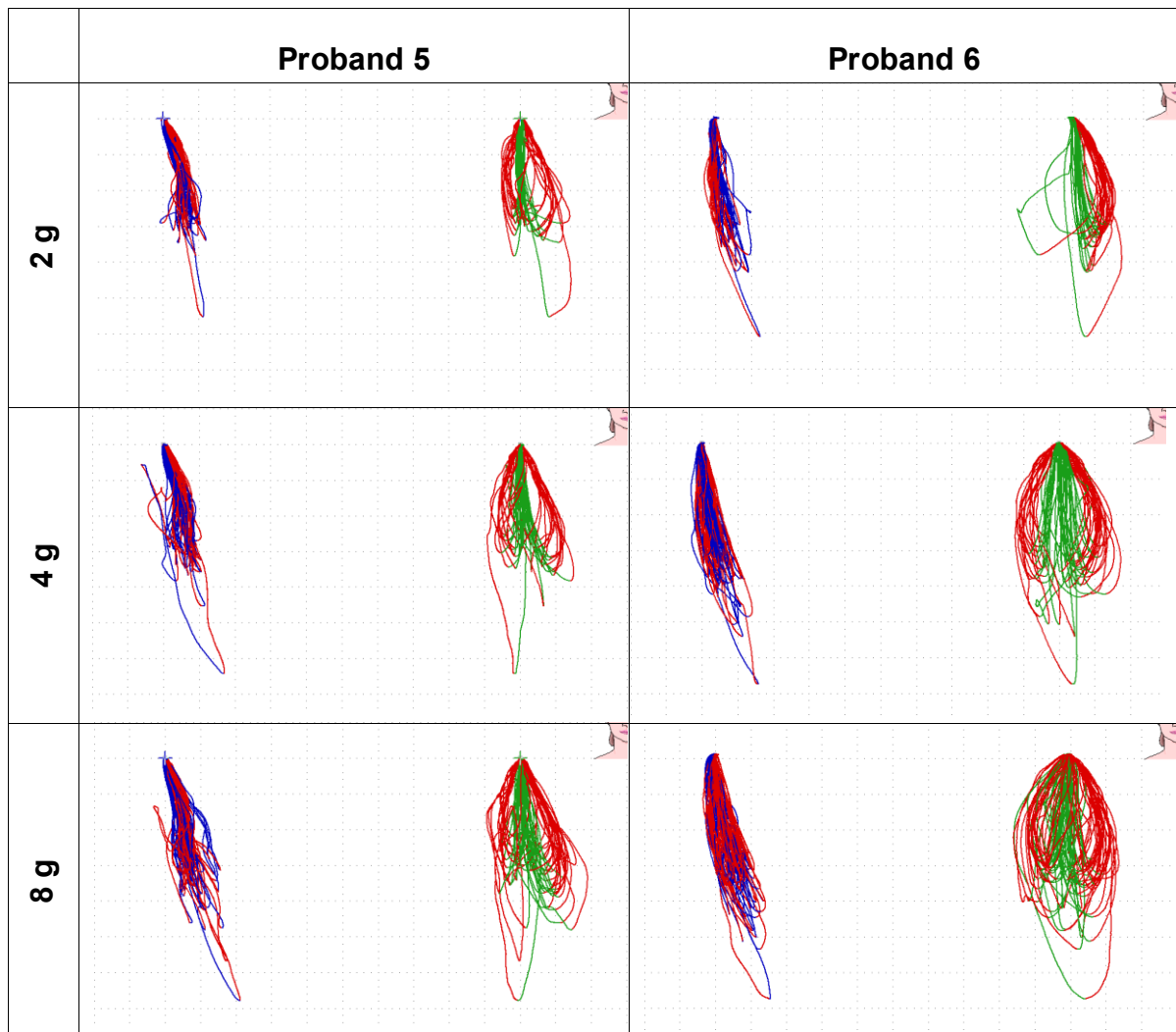
**Abb. 14:** Kaumuster zweier Probanden bei drei Durchgängen mit je 8 g Kaugutmenge. Die graphische Darstellung einer Kausequenz von Kaubeginn bis zum Schlucken ergibt das Kaumuster. Intraindividuell waren die einzelnen Kaumuster sehr ähnlich. Rot-blaue Spuren: Kaumuster in der Sagittalebene; rot-grüne Spuren: Kaumuster in der Frontalebene.



**Abb. 15:** Kaumuster zweier Probanden bei Kaugutmengen von 2 g, 4 g und 8 g. Rot-blaue Spuren: Kaumuster in der Sagittalebene; rot-grüne Spuren: Kaumuster in der Frontalebene. Das Kaumuster änderte sich bei zunehmender Kaugutmenge (z. B. Amplitude der maximalen Mundöffnung nimmt zu), blieb aber insgesamt charakteristisch für den Probanden.



**Abb. 16:** Kaumuster zweier Probanden bei Kaugutmengen von 2 g, 4 g und 8 g. Rot-blaue Spuren: Kaumuster in der Sagittalebene; rot-grüne Spuren: Kaumuster in der Frontalebene. Das Kaumuster änderte sich bei zunehmender Kaugutmenge (z. B. Amplitude der maximalen Mundöffnung nimmt zu), blieb aber insgesamt charakteristisch für den Probanden.



**Abb. 17:** Kaumuster zweier Probanden bei Kaugutmengen von 2 g, 4 g und 8 g. Rot-blaue Spuren: Kaumuster in der Sagittalebene; rot-grüne Spuren: Kaumuster in der Frontalebene. Das Kaumuster änderte sich bei zunehmender Kaugutmenge (z. B. Amplitude der maximalen Mundöffnung nimmt zu), blieb aber insgesamt charakteristisch für den Probanden.

### 4.3 Maximale Mundöffnung bei unterschiedlichen Kaugutmengen

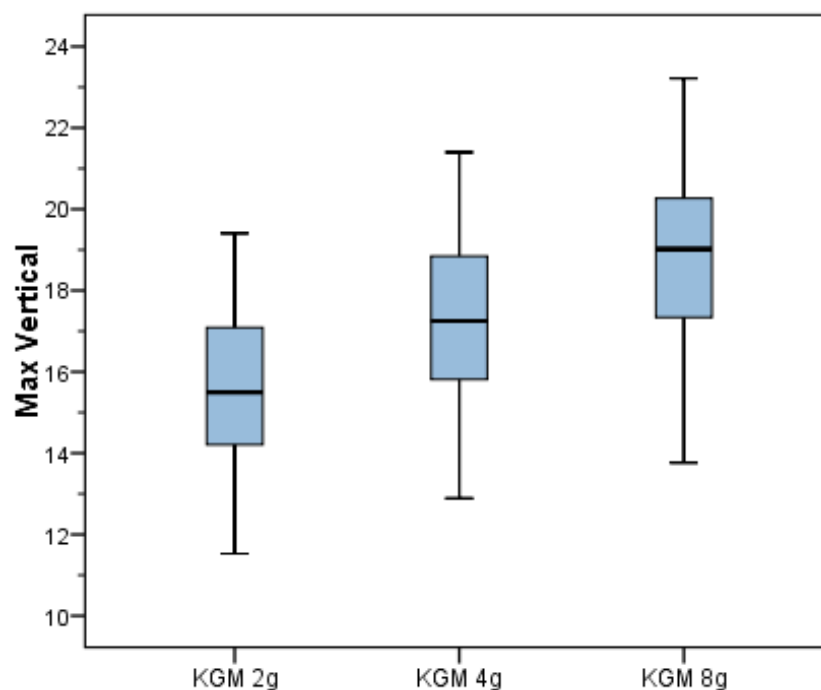
Für die Analyse der Unterschiede in der maximalen Mundöffnung wurden die Maxima aller Kauzyklen gemittelt. Die Amplitude der Mundöffnung während des Kauens vergrößerte sich mit steigender Kaugutmenge. Der Betrag der Strecken war bei 2 g 15,7 mm (SA 1,94), bei 4 g 17,3 mm (SA 1,96) und bei 8 g 18,8 mm (SA 2,04). Sowohl zwischen 2 g und 4 g als auch zwischen 4 g und 8 g bestanden signifikante Unterschiede (lineare Kontraste,  $p < 0,001$ ) (Tab. 6). Abb. 18 veranschaulicht die Ergebnisse in Form von Boxplots.



Für die Plots gilt generell, dass die Boxen alle Werte umfassen, die innerhalb des unteren und oberen Quartils liegen. Die Balken innerhalb der Boxen geben die Medianwerte wieder. Die Whisker kennzeichnen Minimum und Maximum. Die Bedingung der Sphärizität wurden hier verletzt (Mauchly-Test,  $p = 0,010$ ), bei den Tests auf Innersubjekteffekte war eine Korrektur (nach Greenhouse-Geisser) erforderlich.

Maximale Mundöffnung (in mm)	N	Mittelwert [mm]	Standardabweichung	Minimum [mm]	Maximum [mm]	Perzentile [mm]		
						25.	50. (Median)	75.
bei KGM 2 g	53	15,7	1,94	11,5	19,4	14,2	15,5	17,1
bei KGM 4 g	53	17,3	1,96	12,9	21,4	15,8	17,3	18,9
bei KGM 8 g	53	18,8	2,04	13,8	23,2	17,3	19,0	20,3

**Tab. 6:** Maximale Mundöffnung bei unterschiedlichen Kaugutmengen (KGM). Werte gerundet.



**Abb. 18:** Maximale Mundöffnung (Max Vertical) in Millimeter in Abhängigkeit von der Kaugutmenge (KGM). Die Balken innerhalb der Boxen geben die Medianwerte wieder. Die Stichprobengröße umfasste 53 Probanden.

#### 4.4 Unterkieferbewegungen in der Transversalen bei unterschiedlichen Kaugutmengen

Die Amplitude der Lateralbewegungen stieg mit zunehmender Nahrungsmenge. Mit einer Ausnahme waren die Unterschiede zwischen den Kaugutmengen signifikant (Tab. 8). Insgesamt wurden bei Schließbewegungen größere Lateralbewegungen ausgeführt als bei Öffnungsbewegungen und das durchschnittliche Bewegungsausmaß war zur linken Seite hin größer als zur rechten. Die Strecken bei Rechts-Laterotrusion betrugen: beim Öffnen 1,3 mm bei 2 g (SA 0,75), 1,4 mm bei 4 g (SA 0,71), 1,5 mm bei 8 g (SA 0,76) und beim Schließen 2,2 g bei 2 g (SA 1,03), 2,4 g bei 4 g (SA 1,01) und 2,6 g bei 8 g (SA 1,06). Bei Links-Laterotrusion waren die Beträge: beim Öffnen 2,8 g bei 2 g (SA 0,98), 3,0 g bei 4 g (SA 0,93), 3,3 g bei 8 g (SA 0,95) und beim Schließen 3,2 g bei 2 g (SA 1,4), 3,5 g bei 4 g (SA 1,25), 3,9 g bei 8 g (SA 1,15) (Tab. 7-11).

Da während der Öffnungsbewegung bei Kaugutmenge 8 g signifikante Abweichungen von der Normalverteilung beim Bewegungsausmaß nach rechts auftraten, wurden bei diesen Werten der Friedman-Test und anschließend der Wilcoxon-Test durchgeführt. Bei allen anderen Daten konnte die Varianzanalyse für Messwiederholungen eingesetzt werden. Der Mauchly-Test ( $p = 0,025$ ) ergab, dass die Bedingung der Sphärizität hier verletzt wurde, eine Korrektur (nach Greenhouse-Geisser) bei den Tests auf Innersubjekteffekte war notwendig.

	Unterschied zwischen	
	2 g und 4 g	4 g und 8 g
Öffnungsbewegung nach rechts	0,020	0,001
Schließbewegung nach rechts	0,047	0,041
Öffnungsbewegung nach links	0,006	< 0,001
Schließbewegung nach links	0,109	0,001

**Tab. 7:** p-Werte für Unterschiede zwischen den drei Kaugutmen-  
gen im lateralen Bewegungsausmaß.

Lateralbewegung nach rechts beim Öffnen (in mm)	N	Mittelwert	Standardab- weichung	Minimum	Maximum	Perzentile		
						25.	50. (Median)	75.
bei KGM 2 g	53	1,3	,75	,3	3,4	,6	1,2	1,8
bei KGM 4 g	53	1,4	,71	,4	3,9	,8	1,3	1,8
bei KGM 8 g	53	1,5	,76	,3	3,7	1,0	1,5	1,9

**Tab. 8:** Abweichungen von der Mittellinie nach rechts während der Öffnungsbewegung bei unterschiedlichen Kaugutmengen (KGM). Werte gerundet.

Lateralbewegung nach links beim Öffnen (in mm)	N	Mittelwert	Standardab- weichung	Minimum	Maximum	Perzentile		
						25.	50. (Median)	75.
bei KGM 2 g	53	2,8	,98	,6	4,8	2,0	2,8	3,5
bei KGM 4 g	53	3,0	,93	1,0	5,4	2,3	3,1	3,6
bei KGM 8 g	53	3,3	,95	1,0	5,5	2,8	3,3	3,9

**Tab. 9:** Abweichungen von der Mittellinie nach links während der Öffnungsbewegung bei unterschiedlichen Kaugutmengen (KGM). Werte gerundet.

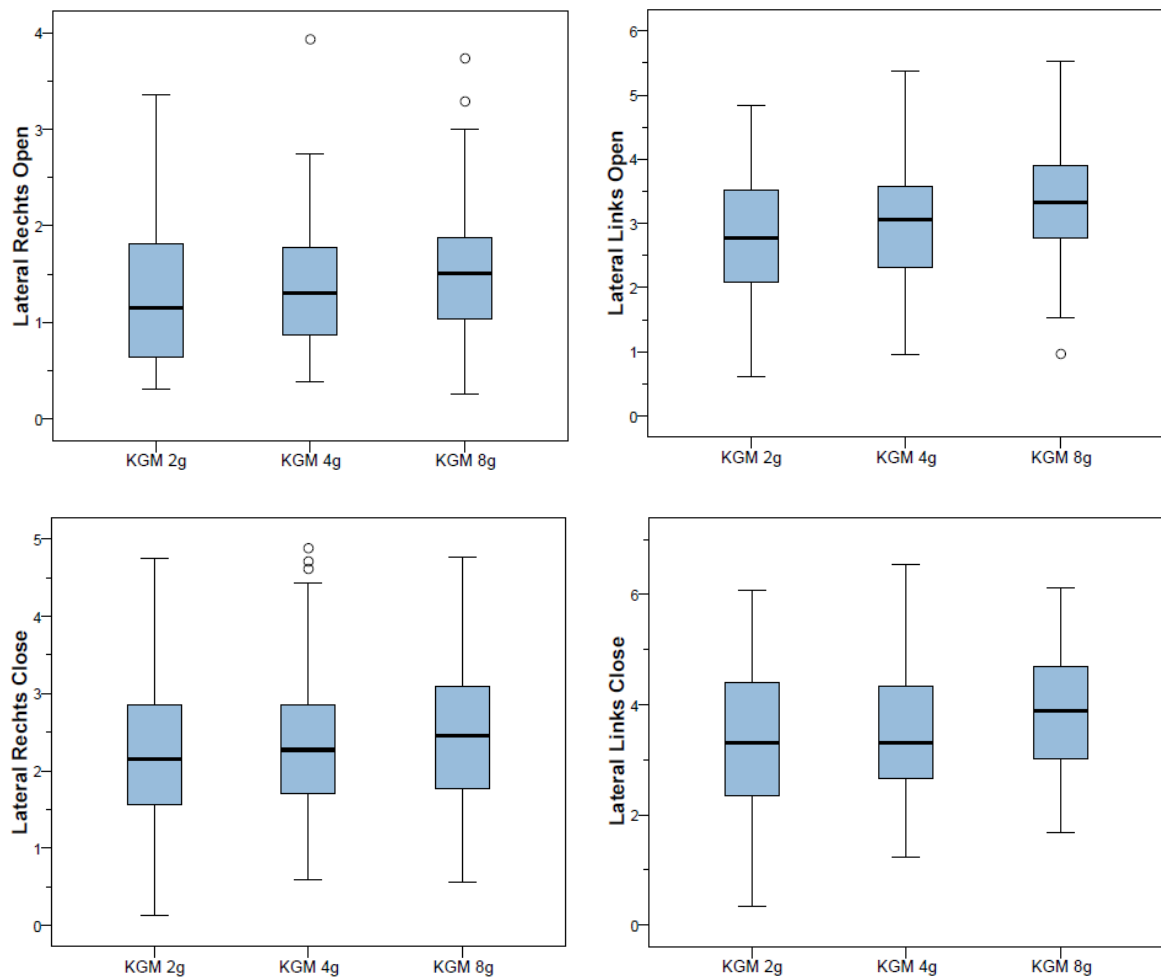
Lateralbewegung nach rechts beim Schließen (in mm)	N	Mittelwert	Standardab- weichung	Minimum	Maximum	Perzentile		
						25.	50. (Median)	75.
bei KGM 2 g	53	2,2	1,03	,1	4,7	1,5	2,1	2,9
bei KGM 4 g	53	2,4	1,01	,6	4,9	1,7	2,3	2,9
bei KGM 8 g	53	2,6	1,06	,6	4,8	1,8	2,5	3,2

**Tab. 10:** Abweichungen von der Mittellinie nach rechts während der Schließbewegung bei unterschiedlichen Kaugutmengen (KGM). Werte gerundet.

Lateralbewegung nach links beim Schließen (in mm)	N	Mittelwert	Standardab- weichung	Minimum	Maximum	Perzentile		
						25.	50. (Median)	75.
bei KGM 2 g	53	3,2	1,40	,3	6,1	2,3	3,3	4,4
bei KGM 4 g	53	3,5	1,25	1,2	6,6	2,6	3,3	4,4
bei KGM 8 g	53	3,9	1,15	1,7	6,1	3,0	3,9	4,7

**Tab. 11:** Abweichungen von der Mittellinie nach links während der Schließbewegung bei unterschiedlichen Kaugutmengen (KGM). Werte gerundet.

Die Boxplots veranschaulichen, dass sich die Bewegungsamplituden bei den Öffnungs-  
bewegungen deutlicher als bei den Schließbewegungen unterschieden (Abb. 19). Darüber  
hinaus wird beim Blick auf die Mediane optisch nachvollziehbar, wie gering die Unter-  
schiede der Linksbewegung beim Schließen zwischen Kaugutmenge 2 g und 4 g waren.  
Sie waren ohne statistische Signifikanz ( $p = 0,109$ ).



**Abb. 19:** Abweichungen von der Mittellinie nach rechts und links bei unterschiedlichen Kaugutmengen (KGM). Lagen die Whisker mehr als 1,5 bis zu 3 Interquartilsabstände von der Box entfernt, wurden sie in Form von Kreisen als Ausreißer gekennzeichnet. Die zugrundeliegende Stichprobe umfasste 53 Probanden.

Das größere Bewegungsausmaß während einer Schließphase wurde häufiger auf der linken Seite erreicht (Tab. 12). Zur Berechnung dieser Werte wurden alle Daten herangezogen, die Kaugutmenge wurde jedoch nicht beachtet. Bei 73 Kauzyklen waren die Werte für rechts und links gleich, und flossen deshalb nicht in die Berechnung ein.

Seite des Kieferschlusses	Anzahl	Prozent
links	8.433	58,2
rechts	6.059	41,8

**Tab. 12:** Seite des größeren lateralen Bewegungsausmaßes während der Schließbewegung.

#### 4.5 Unterkieferbewegungen in der Sagittalebene bei unterschiedlichen Kaugutmengen

Das Bewegungsausmaß in sagittaler Richtung war niedrig. Die Unterschiede zwischen den Kaugutmengen waren somit ebenfalls gering. Die Analyse auf Signifikanz ergab, dass sich der Bewegungsumfang nach posterior mit steigender Kaugutmenge erhöhte, nach anterior war dies nicht eindeutig nachweisbar (Bewegungsamplitude in posteriorer Richtung: Signifikante Unterschiede zwischen Kaugutmenge 2 g und 4 g sowie zwischen 4 g und 8 g (Wilcoxon-Test für Paardifferenzen,  $p < 0,001$ ). Bewegungsamplitude nach anterior: Signifikanter Unterschied zwischen 2 g und 4 g ( $p = 0,011$ ), jedoch kein signifikanter Unterschied belegbar zwischen 4 g und 8 g) (Tab. 13).

	Unterschied zwischen	
	2 g und 4 g	4 g und 8 g
Bewegung nach anterior	0,011	0,068
Bewegung nach posterior	< 0,001	< 0,001

**Tab. 13:** p-Werte für Unterschiede zwischen den drei Kaugutmengen im sagittalen Bewegungsausmaß.

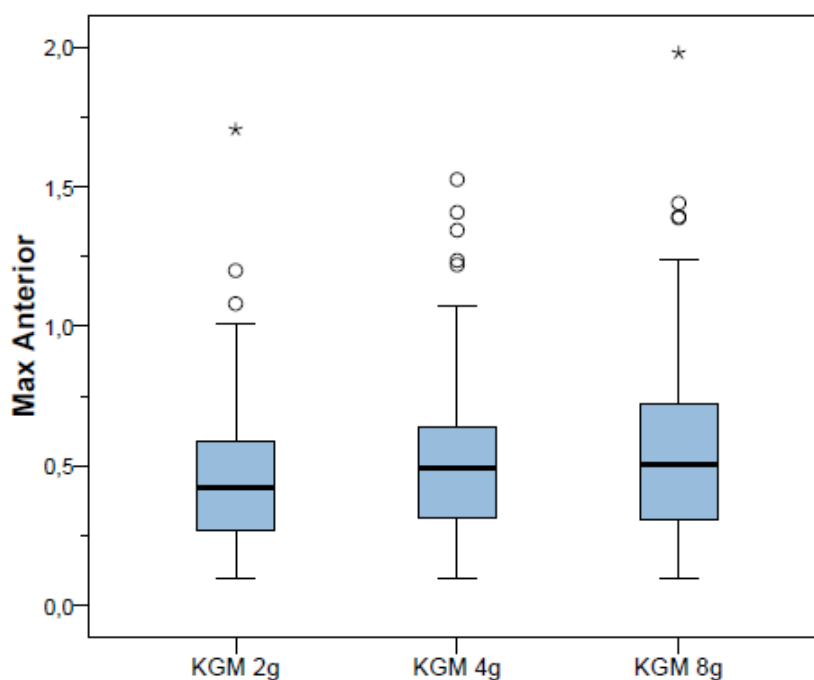
Die Strecken der Anteriorbewegung betrugen 0,48 mm bei 2 g (SA 0,48), 0,54 mm bei 4 g (SA 0,34), und 0,59 mm bei 8 g (SA 0,39), die der Posteriorbewegung 4,8 g bei 2 g (SA 2,09), 5,5 g bei 4 g (SA 2,4) und 6,3 g bei 8 g (SA 2,39) (Tab. 14).

Bewegung nach anterior (in mm)	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum	Perzentile		
						25.	50. (Median)	75.
bei KGM 2g	53	,48	,30	,10	1,71	,27	,42	,59
bei KGM 4g	53	,54	,34	,10	1,53	,31	,48	,64
bei KGM 8g	52	,59	,39	,10	1,98	,30	,51	,73

**Tab. 14:** Bewegungen nach anterior bei unterschiedlichen Kaugutmengen (KGM). Werte gerundet.

Bei der Kaugutmenge 8 g fehlen die Daten eines Probanden, die Fallzahl N ist hier 52. Bei den Werten für die Bewegungen nach anterior traten Abweichungen von der Normalverteilung auf. Die Untersuchung auf signifikante Unterschiede in der Sagittalen wurde aus diesem Grunde mit dem Friedman-Test und anschließend mit dem Wilcoxon-Test durchgeführt.

Die Boxplots in Abb. 20 veranschaulichen, dass die Medianwerte für die Kaugutmengen 2 g und 4 g deutlich unterschiedlich ausfielen, wohingegen die Medianwerte für 4 g und 8 g nur geringfügig differierten.



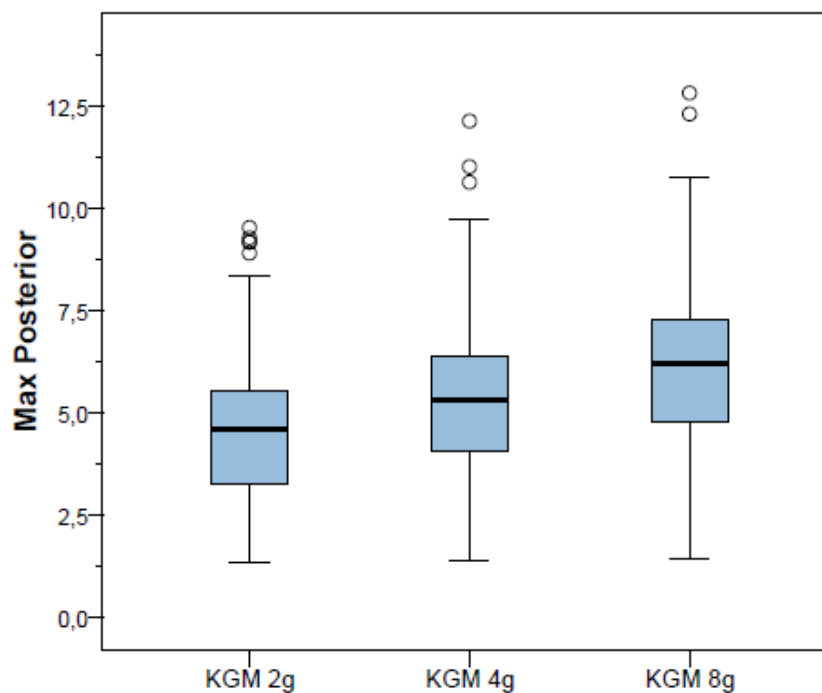
**Abb. 20:** Maximales Bewegungsmaß nach anterior (Max Anterior) in Millimeter in Abhängigkeit von der Kaugutmenge (KGM). Lagen die Whisker mehr als 1,5 bis zu 3 Interquartilsabständen von der Box entfernt, wurden sie in Form von Kreisen als Ausreißer gekennzeichnet. Werte, die über 3 Kastenlängen vom benachbarten Rand der Box abwichen, sind in Form von Sternen als Extremwerte ausgewiesen. Die zugrundeliegende Stichprobe umfasste bei KGM 2 g und 4 g 53 Probanden, bei KGM 8 g 52 Probanden.

Da bei den Werten des posterioren Bewegungsumfangs bei Kaugutmenge 2 g Abweichungen von der Normalverteilung auftraten, erfolgte die weitere Analyse mit dem Friedman- und dem Wilcoxon-Test. Diese ergaben signifikante Unterschiede zwischen allen drei Kaugutmengen ( $p < 0,001$ ), somit nahm der Bewegungsumfang des Unterkiefers in posteriorer Richtung mit steigender Kaugutmenge zu (Tab. 15).

Bewegung nach posterior (in mm)	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum	Perzentile		
						25.	50. (Median)	75.
bei KGM 2g	53	4,8	2,09	1,3	9,5	3,2	4,6	5,7
bei KGM 4g	53	5,5	2,40	1,4	12,1	4,1	5,3	6,6
bei KGM 8g	53	6,3	2,39	1,4	12,8	4,7	6,2	7,4

**Tab. 15:** Bewegungen nach posterior bei unterschiedlichen Kaugutmengen (KGM). Werte gerundet.

Die Minima unterschieden sich nur geringfügig, die Medianwerte zeigten tendentielle Unterschiede zwischen den drei Kaugutmengen (Abb. 21).



**Abb. 21:** Maximales Bewegungsausmaß nach posterior (Max Posterior) in Millimeter in Abhängigkeit von der Kaugutmenge (KGM). Lagen die Whisker mehr als 1,5 bis zu 3 Interquartilsabstände von der Box entfernt, wurden sie in Form von Kreisen als Ausreißer gekennzeichnet. Die Fallzahl war 53.

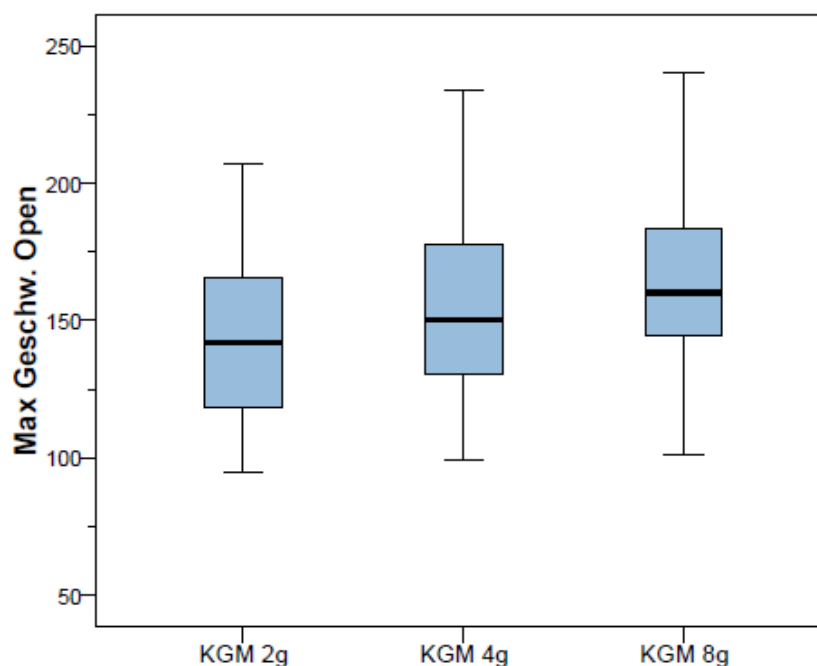
## 4.6 Geschwindigkeit und Dauer der Unterkieferbewegungen

### 4.6.1 Maximale und durchschnittliche Geschwindigkeit der Öffnungs- und Schließbewegungen des Unterkiefers bei unterschiedlichen Kaugutmengen

Die Unterschiede in der maximalen Geschwindigkeit der Öffnungsbewegung bei unterschiedlichen Kaugutmengen waren signifikant. Die maximale Geschwindigkeit der Öffnungsbewegung stieg mit zunehmender Kaugutmenge an (lineare Kontraste,  $p < 0,001$  sowohl für die Unterschiede zwischen KGM 2 g und 4 g, als auch zwischen 4 g und 8 g). Es lag keine proportionale Steigerung vor: Bezogen auf das Gewicht des Kaugutes war die Steigerung zwischen 2 g und 4 g größer als zwischen 4 g und 8 g. Die maximale Geschwindigkeit betrug während des Öffnens bei 2 g 144,8 mm/s (SA 28,28), bei 4 g 154,1 mm/s (SA 30,77) und bei 8 g 163,6 mm/s (SA 31,39) (Tab. 16 und Abb. 22).

Maximale Geschwindigkeit beim Öffnen (in mm/s)	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum	Perzentile		
						25.	50. (Median)	75.
bei KGM 2 g	53	144,8	28,28	94,7	207,3	118,1	142,2	165,6
bei KGM 4 g	53	154,1	30,77	99,3	233,9	130,2	150,0	178,2
bei KGM 8 g	53	163,6	31,39	101,4	239,9	143,1	160,2	185,5

**Tab. 16:** Maximale Geschwindigkeit der Öffnungsbewegung bei unterschiedlichen Kaugutmengen (KGM). Werte gerundet.



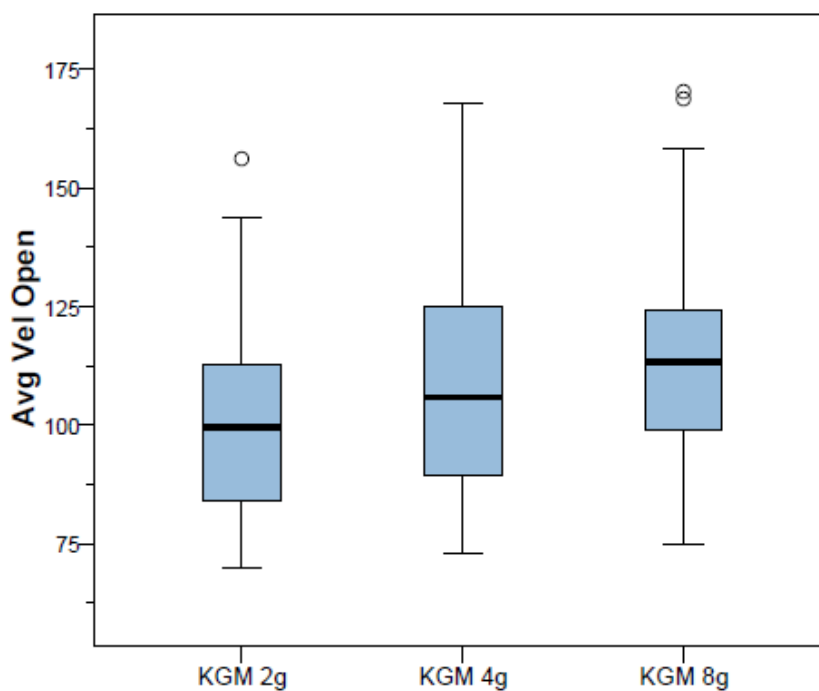
**Abb. 22:** Maximale Geschwindigkeit der Öffnungsbewegung (Max Geschw. Open) in Millimeter pro Sekunde in Abhängigkeit von der Kaugutmenge (KGM). Die Fallzahl war 53.



Auch bei der durchschnittlichen Geschwindigkeit der Öffnungsbewegungen war eine Abhängigkeit von der Kaugutmenge nachweisbar ( $p < 0,001$ ). Die Beträge der durchschnittlichen Geschwindigkeit des Öffnens waren 144,8 mm/s bei 2 g (SA 20,71), 154,1 mm/s bei 4 g (SA 22,54) und 163,6 mm/s bei 8 g (SA 23,1) (Tab. 17, Abb. 23). Die Geschwindigkeit änderte sich im untersuchten Bereich auch hier negativ exponentiell.

Durchschnittliche Geschwindigkeit beim Öffnen (in mm/s)	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum	Perzentile		
						25.	50. (Median)	75.
bei KGM 2 g	53	101,2	20,71	69,8	156,2	83,6	99,6	114,8
bei KGM 4 g	53	108,0	22,54	73,0	168,0	89,6	105,8	126,3
bei KGM 8 g	53	114,9	23,10	75,0	170,3	96,9	113,3	125,2

**Tab. 17:** Durchschnittliche Geschwindigkeit der Öffnungsbewegung bei unterschiedlichen Kaugutmengen (KGM). Werte gerundet.

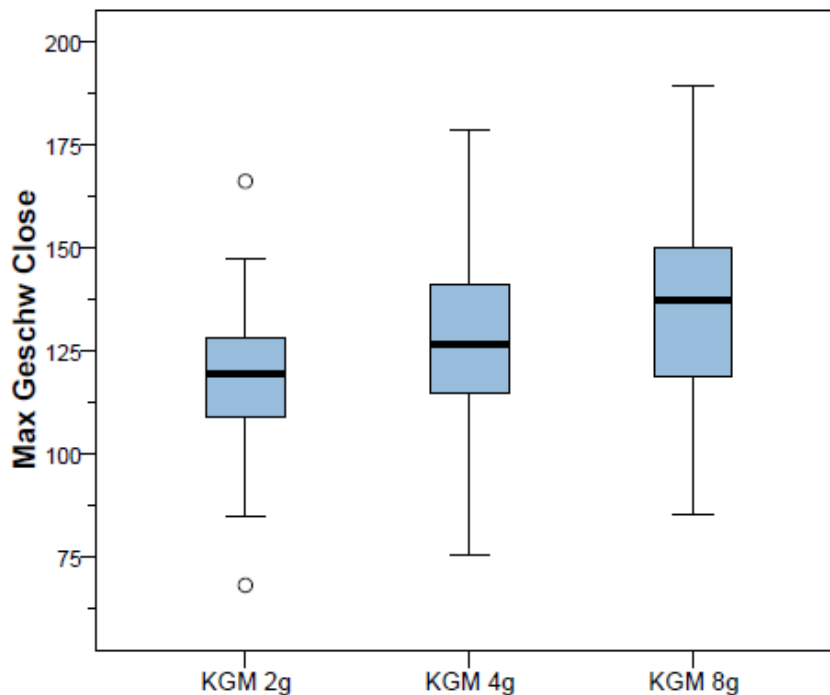


**Abb. 23:** Durchschnittliche Geschwindigkeit der Öffnungsbewegung (Avg Vel Open) in Millimeter pro Sekunde in Abhängigkeit von der Kaugutmenge (KGM). Lagen die Whisker mehr als 1,5 bis zu 3 Interquartilsabstände von der Box entfernt, wurden sie in Form von Kreisen als Ausreißer gekennzeichnet. Die zugrundeliegende Stichprobe umfasste 53 Probanden.

Die maximale Geschwindigkeit der Schließbewegung war niedriger als die der Öffnungsbewegung: 117,8 mm/s bei 2 g (SA 17,97), 127,1 mm/s bei 4 g (SA 19,11) und 135,6 mm/s bei 8 g (SA 20,8) (Tab. 18, Abb. 24), aber auch sie stieg in gleicher Weise bei zunehmender Kaugutmenge signifikant an ( $p < 0,001$ ).

Maximale Geschwindigkeit beim Schließen (in mm/s)	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum	Perzentile		
						25.	50. (Median)	75.
bei KGM 2 g	53	117,8	17,97	68,3	166,3	107,2	119,6	128,3
bei KGM 4 g	53	127,1	19,11	75,7	178,8	113,5	126,7	142,2
bei KGM 8 g	53	135,6	20,80	85,3	189,2	118,9	137,4	151,0

**Tab. 18:** Maximale Geschwindigkeit der Schließbewegung bei unterschiedlichen Kaugutmengen (KGM). Werte gerundet.



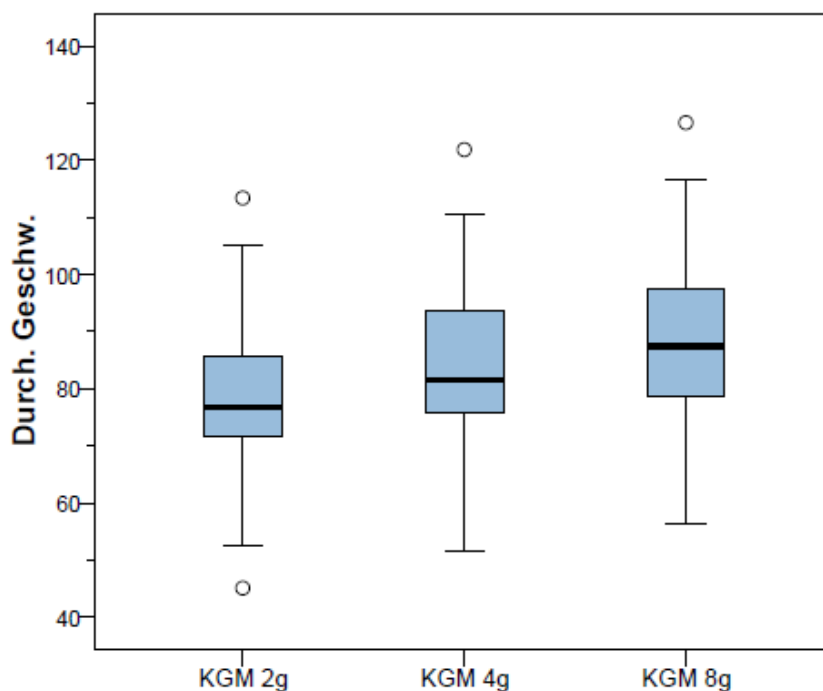
**Abb. 24:** Maximale Geschwindigkeit der Schließbewegung (Max Geschw Close) in Millimeter pro Sekunde in Abhängigkeit von der Kaugutmenge (KGM). Lagen die Whisker mehr als 1,5 bis zu 3 Interquartilsabstände von der Box entfernt, wurden sie in Form von Kreisen als Ausreißer gekennzeichnet. Die zugrundeliegende Stichprobe umfasste 53 Probanden.

Auch bei der durchschnittlichen Geschwindigkeit der Schließbewegung bestanden signifikante Unterschiede zwischen den drei Kaugutmengen ( $p < 0,001$ ). Die Ergebnisse von 77,4 mm/s bei 2 g (SA 13,42), 83,3 mm/s bei 4 g (SA 13,9) und 88,1 mm/s bei 8 g (SA 15,26) zeigen, dass keine lineare, sondern eine negativ-exponentielle Steigerung bei

zunehmender Kaugutmenge stattfand (Tab. 19). Abb. 25 stellt die Ergebnisse in Form von Boxplots dar. Die Bedingung der Sphärizität wurde hier verletzt (Mauchly-Test, maximale Geschwindigkeit:  $p = 0,003$  (Öffnungsbewegung) und  $p < 0,001$  (Schließbewegung), durchschnittliche Geschwindigkeit:  $p = 0,014$  (Öffnungsbewegung) und  $p < 0,001$  (Schließbewegung)). Daher wurde eine Korrektur (nach Greenhouse-Geisser) der Tests auf Innersubjekteffekte bei der Analyse der Geschwindigkeiten durchgeführt.

Durchschnittliche Geschwindigkeit (in mm/s)	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum	Perzentile		
						25.	50. (Median)	75.
bei KGM 2 g	53	77,4	13,42	45,1	113,4	71,1	76,7	85,7
bei KGM 4 g	53	83,3	13,90	51,5	121,9	75,2	81,5	93,7
bei KGM 8 g	53	88,1	15,26	56,3	126,6	78,2	87,4	98,6

**Tab. 19:** Durchschnittliche Geschwindigkeit der Schließbewegung bei unterschiedlichen Kaugutmengen (KGM). Werte gerundet.



**Abb. 25:** Durchschnittliche Geschwindigkeit der Schließbewegung (Durch. Geschw.) in Millimeter pro Sekunde in Abhängigkeit von der Kaugutmenge (KGM). Lagen die Whisker mehr als 1,5 bis zu 3 Interquartilsabstände von der Box entfernt, wurden sie in Form von Kreisen als Ausreißer gekennzeichnet. Die Stichprobengröße war 53.

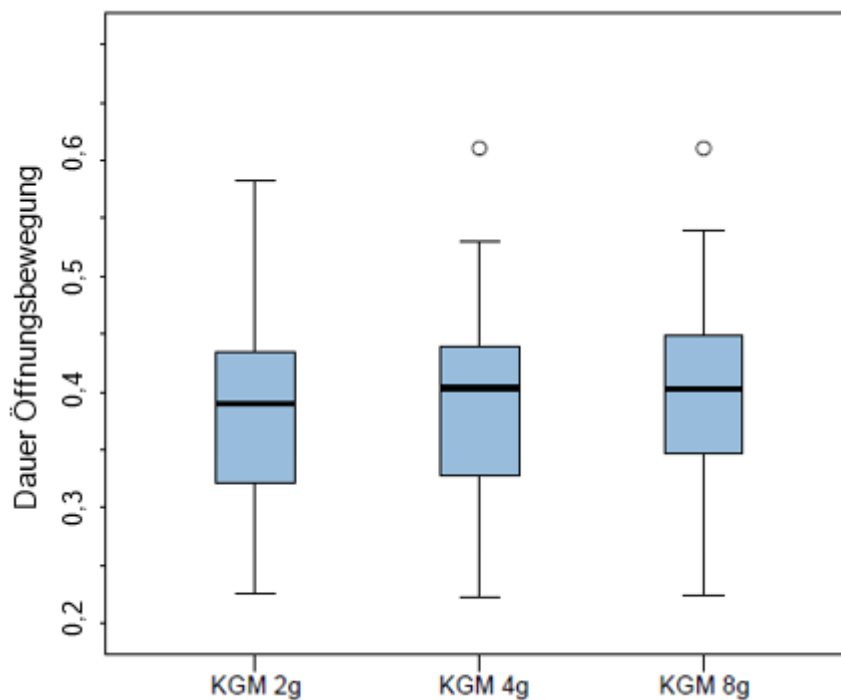
#### 4.6.2 Dauer von Kauzyklus und Kausequenz bei unterschiedlichen Kaugutmengen

Für die Dauer der Schließbewegung im Bereich zwischen 2 g und 4 g sowie für die Dauer der Öffnungsbewegung ergab sich statistisch keine Abhängigkeit von der Portionsgröße des Speisebolus (ANOVA für Messwiederholungen,  $p = 0,212$ ). Nur zwischen Kaugutmenge 4 g und 8 g bestanden signifikante Unterschiede in der Dauer der Schließbewegung

( $p = 0,005$ ). Der Mittelwert der Öffnungsdauer zeigten eine leichte Zunahme mit der Kaugutmenge, der Median jedoch nicht. Die Dauer einer Schließbewegung war mit 0,39 s bei 2 g (SA 0,06), 0,40 s bei 4 g (SA 0,06) und 0,41 s bei 8 g (SA 0,07) Millisekunden geringfügig länger als die der Öffnungsbewegung 0,39 s (SA 0,06), 0,39 s (SA 0,06) sowie 0,40 s (SA 0,06) (Tab. 20 und 21 sowie Darstellung als Boxplots in Abb. 26 und 27).

Dauer der Öffnungsbewegung (in Millisekunden)	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum	Perzentile		
						25.	50. (Median)	75.
bei KGM 2 g	53	0,39	0,06	0,26	0,55	0,34	0,39	0,43
bei KGM 4 g	53	0,39	0,06	0,26	0,57	0,34	0,40	0,43
bei KGM 8 g	53	0,40	0,06	0,26	0,57	0,35	0,40	0,44

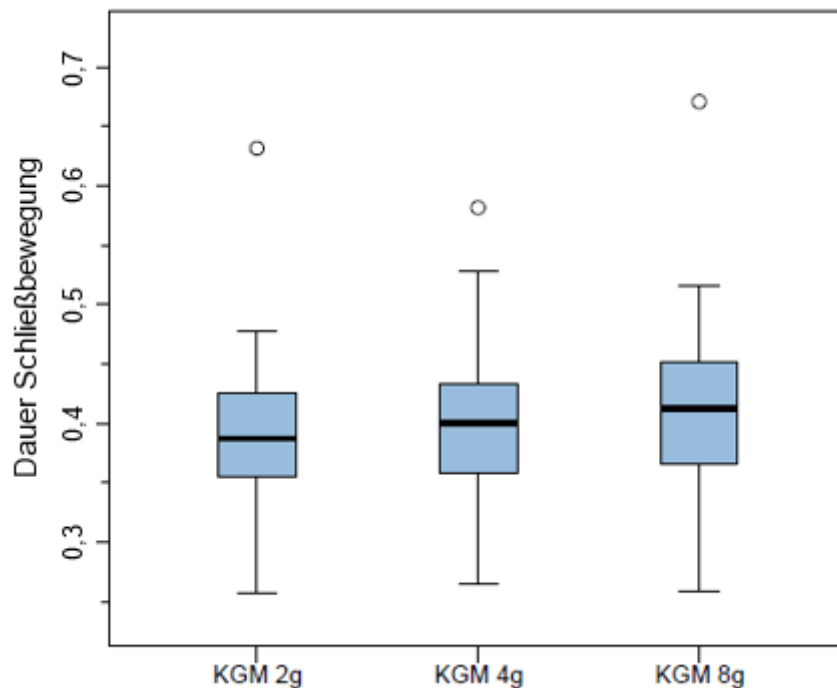
**Tab. 20:** Dauer der Öffnungsbewegung bei unterschiedlichen Kaugutmengen (KGM). Werte gerundet.



**Abb. 26:** Dauer der Öffnungsbewegung in Sekunden in Abhängigkeit von der Kaugutmenge (KGM) in Gramm. Liegen die Whisker mehr als 1,5 bis zu 3 Interquartilsabstände von der Box entfernt, wurden sie in Form von Kreisen als Ausreißer gekennzeichnet. Die zugrundeliegende Stichprobe umfasste 53 Probanden.

Dauer der Schließbewegung (in Sekunden)	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum	Perzentile		
						25.	50. (Median)	75.
bei KGM 2 g	53	0,39	0,06	0,26	0,63	0,35	0,39	0,43
bei KGM 4 g	53	0,40	0,06	0,27	0,58	0,36	0,40	0,44
bei KGM 8 g	53	0,41	0,07	0,26	0,67	0,37	0,41	0,45

**Tab 21:** Dauer der Schließbewegung bei unterschiedlichen Kaugutmengen (KGM). Werte gerundet.



**Abb. 27:** Dauer der Schließbewegung in Sekunden in Abhängigkeit von der Kaugutmenge (KGM) in Gramm. Liegen die Whisker mehr als 1,5 bis zu 3 Interquartilsabstände von der Box entfernt, wurden sie in Form von Kreisen als Ausreißer gekennzeichnet. Der Umfang der zugrundeliegenden Stichprobe war 53.

Da der Mauchly-Test ( $p = 0,044$ ) ergab, dass die Bedingungen der Sphärizität bei der Dauer der Schließbewegung verletzt wurde, war bei den Tests auf Innersubjekteffekte eine Korrektur (nach Greenhouse-Geisser) erforderlich.

Die Dauer einer Kausequenz setzt sich aus der Dauer der Kauzyklen multipliziert mit der Anzahl der Kauzyklen zusammen. Somit nahm aufgrund steigender Anzahl von Kauzyklen die Gesamtdauer einer Kausequenz mit steigender Kaugutmenge zu.

Tab. 22 zeigt neben der durchschnittlichen Dauer der Öffnungs- und Schließbewegung während eines Kauzyklus, die errechnete Dauer eines vollständigen Kauzyklus sowie die Dauer eines gesamten Kauvorganges bei unterschiedlichen Kaugutmengen. Die Probanden kauten durchschnittlich mit einer Frequenz von 1,26 Kauzyklen pro Sekunde, eine Kausequenz mit Karottenstücken von 2, 4 und 8 g dauerte durchschnittlich 17,08 s, 22,21 s und 25,69 s.

in [s]	N	Dauer Öffnen	Dauer Schließen	Durchschnittliche Dauer 1 Zyklus	Anzahl der Kauzyklen	Durchschnittliche Dauer 1 Sequenz
bei KGM 2 g	53	0,39	0,39	0,78	21,8	17,08
bei KGM 4 g	53	0,39	0,40	0,79	28,0	22,21
bei KGM 8 g	53	0,40	0,41	0,81	38,1	25,69

**Tab. 22:** Zusammenfassung. Durchschnittliche Dauer eines Kauzyklus und einer gesamten Sequenz bei unterschiedlichen Kaugutmengen (Mittelwerte, in Sekunden). Werte gerundet.

#### 4.7 Richtungsverlauf der Kauzyklen und Kauseitenpräferenz

Das K7-System berechnet auch den Richtungsverlauf der einzelnen Kauzyklen und kennzeichnet die Ergebnisse mit CW für clockwise/im Uhrzeigersinn verlaufende (vom Betrachter aus gesehen) und CCW für counterclockwise/gegen den Uhrzeigersinn verlaufende Kauzyklen. Die Versuche ergaben, dass die Kauzyklen der Kausequenzen häufiger im Uhrzeigersinn als gegen den Uhrzeigersinn verliefen (Tab. 23).

Anzahl der Schleifen pro Richtung	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum	Perzentile		
						25.	50. (Median)	75.
CW bei KGM 2g	53	14,5	9,7	1,3	47,3	7,2	13,3	17,3
CCW bei KGM 2g	52	7,9	4,8	0,3	19,7	3,8	7,7	11,6
CW bei KGM 4g	53	20,7	10,0	6,3	48,0	13,8	19,0	25,3
CCW bei KGM 4g	53	8,6	4,6	0,3	18,0	5,2	9,7	12,0
CW bei KGM 8g	53	31,4	9,1	7,0	50,7	24,7	32,7	38,0
CCW bei KGM 8g	53	8,4	3,7	0,3	15,0	5,8	9,0	11,2

**Tab. 23:** Bewegungsrichtung des Unterkiefers beim Kauen unterschiedlicher Kaugutmengen (KGM). Anzahl der vom Betrachter aus im Uhrzeigersinn durchgeführten Kauzyklen (CW – clockwise), Anzahl der gegen den Uhrzeigersinn ausgeübten Kauzyklen (CCW – counterclockwise). Werte gerundet.

Mit zunehmender Kaugutmenge wurde die Richtungspräferenz in einer Kausequenz verstärkt, im Uhrzeigersinn ausgeführte Kauzyklen nahmen stärker zu als gegenläufige Zyklen: CW/CCW war bei 2 g 14,5/7,9 Kauzyklen (SA 9,7/4,8), bei 4 g 20,7/8,6 Kauzyklen (SA 10,0/4,6) und bei 8 g 31,4/8,4 Kauzyklen (SA 9,1/3,7).

Der erste Kauzyklus einer Kausequenz verlief größtenteils im Uhrzeigersinn (Tab. 24-26). Für diesen Zyklus war mit steigender Kaugutmenge eine Abnahme der Präferenz zu beobachten. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die Daten zudem auf das Gesamtkollektiv bezogen (N=53 Probanden, diese entsprechen 100 %, siehe Tab. 22a-i: „gültige Prozenze“). Bei einer Kaugutmenge von 2 g starteten 98,1 % (1. Durchgang) bzw. 100 % (2. und 3. Durchgang) der Probanden auf der rechten Seite. Bei einer Kaugutmenge von 4 g waren es 96,1 %, 96,2 % und 100 % der Probanden (Durchgang 1-3), die rechts bevorzugten, während sich bei einer Kaugutmenge von 8 g folgende prozentuale Verteilung ergab: 86,0 %, 83,0 % und 80,8 %.

		Häufigkeit			Prozent			Gültige Prozente			Kumulierte Prozen- te		
	Durchgang	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	CW	51	53	53	96,2	100	100	<b>98,1</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	98,1	100	100
Gültig	CCW	1			1,9			<b>1,9</b>			100		
	Gesamt	52			98,1			100					
Fehlend	System	1			1,9								
Gesamt		53			100								

**Tab. 24:** Startrichtung beim Kauen der Kaugutmenge 2 g (1.-3. Durchgang). CW = aus Sicht des Betrachters im Uhrzeigersinn durchgeführte Kauzyklen und damit Startseite rechts, CCW = aus Sicht des Betrachters gegen den Uhrzeigersinn durchgeführte Kauzyklen. Nicht alle Kauzyklen wurden bei der Kaugutmenge 2 g vollständig aufgezeichnet, sodass nicht die Daten aller 53 Probanden in die Berechnung einfließen konnten. Aus diesem Grunde sind in der Tabelle sowohl die tatsächlichen Fallzahlen mit den Angaben zur Startseite, als auch die Zahl der fehlenden Fälle aufgeführt. Werte gerundet.

		Häufigkeit			Prozent			Gültige Prozente			Kumulierte Prozen- te		
	Durchgang	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	CW	49	51	53	92,5	96,2	100	<b>96,1</b>	<b>96,2</b>	<b>100</b>	96,1	96,2	100
Gültig	CCW	2	2		3,8	3,8		<b>3,9</b>	<b>3,8</b>		100	100	
	Gesamt	51	53		96,2	100		100	100				
Fehlend	System	2			3,8								
Gesamt		53			100								

**Tab. 25:** Startrichtung beim Kauen der Kaugutmenge 4 g (1.-3. Durchgang). CW = im Uhrzeigersinn durchgeführte Kauzyklen und damit Startseite rechts (Seite auf der der Nahrungsbolus während des ersten Kauzyklus zu liegen kommt rechts), CCW = gegen den Uhrzeigersinn durchgeführte Kauzyklen und damit Startseite links. Nicht alle Kauzyklen wurden bei Kaugutmenge 4 g vollständig aufgezeichnet, daher konnten nicht die Daten aller 53 Probanden in die Berechnung einfließen. Aus diesem Grunde sind in der Tabelle sowohl die tatsächlichen Fallzahlen mit den Angaben zur Startseite, als auch die Zahl der fehlenden Fälle aufgeführt. Werte gerundet.

		Häufigkeit			Prozent			Gültige Prozente			Kumulierte Prozen- te		
	Durchgang	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	CW	43	44	42	81,1	83	79,2	<b>86</b>	<b>83</b>	<b>80,8</b>	86	83	80,8
Gültig	CCW	7	9	10	13,2	17	18,9	<b>14</b>	<b>17</b>	<b>19,2</b>	100	100	100
	Gesamt	50	53	52	94,3	100	98,1	100	100	100			
Fehlend	System	3		1	5,7		1,9						
<b>Gesamt</b>		53		53	100		100						

**Tab. 26:** Startrichtung beim Kauen der Kaugutmenge 8 g (1.-3. Durchgang). Nicht alle Kauzyklen wurden bei Kaugutmenge 8 g vollständig aufgezeichnet, sodass nicht die Daten aller 53 Probanden in die Berechnung einfließen konnten. Aus diesem Grunde sind in der Tabelle sowohl die tatsächlichen Fallzahlen mit den Angaben zur Startseite, als auch die Zahl der fehlenden Fälle aufgeführt. Werte gerundet.

Bei der Befragung der Probanden zu ihrer bevorzugten Kauseite (Tab. 27) wurde die rechte Seite häufiger angegeben als die linke. Vielen Probanden war ihre Kauseite unbekannt oder sie nahmen an, keine Seite zu präferieren. Die Befragung ergab zudem ein starkes Überwiegen der Rechtshändigkeit im untersuchten Kollektiv (Tab. 28).

Kauseite	Probanden
rechts	20
links	6
keine	12
weiß nicht	15

**Tab. 27:** Vom Probanden angegebene bevorzugte Kauseite.

Händigkeit	Probanden
Rechts	52
links	1

**Tab. 28:** Vom Probanden angegebene Händigkeit.

## 4.8 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Anzahl der Kauzyklen, welche bis zum finalen Schlucken ausgeführt wurden, war von der Kaugutmenge abhängig. Fast alle Bewegungsamplituden, der Richtungsverlauf sowie die Geschwindigkeit der Unterkieferbewegungen und auch die Gesamtdauer einer Kausequenz zeigten ebenfalls eine Abhängigkeit.

Die Anzahl der Kauzyklen wurde um den Faktor 1,4 (von 2 g auf 4 g) bzw. um 1,5 (von 4 g auf 8 g) gesteigert. Die maximale Mundöffnung wurde bei Verdopplung der Kaugutmenge im Bereich von 2 g bis 8 g durchschnittlich um ca. 1,5 mm vergrößert. Die maximale Geschwindigkeit der Öffnungsbewegungen war im Durchschnitt bei 4 g 9,3 mm/s höher als bei 2 g und bei 8 g wiederum 9,5 mm/s höher als bei 4 g, die maximale Geschwindigkeit der Schließbewegung stieg um 6,8 und 6,9 mm/s. Die durchschnittliche Geschwindigkeit der Öffnungsbewegungen erhöhte sich von 2 g auf 4 g und 4 g auf 8 g im Schnitt um 9,3 und 8,5 mm/s, die der Schließbewegung um 5,9 und 4,8 mm/s. Die Dauer eines Kauzyklus blieb annähernd konstant (0,78 s bei 2 g, 0,79 s bei 4 g, 0,81 s bei 8 g), die Dauer einer gesamten Kausequenz nahm aufgrund der Erhöhung der Kauzyklenzahl zu (17,08 s, 22,21 s und 25,69 s). Das Bewegungsausmaß in der Transversalen wurde nach rechts durchschnittlich um 0,1-0,2 mm gesteigert, nach links um 0,2-0,4 mm. Für das Bewegungsausmaß nach anterior ließ sich eine Abhängigkeit von der Kaugutmenge bei Verdopplung von 2 g auf 4 g nachweisen, die Steigerung betrug hier durchschnittlich 0,06 mm. Richtung posterior nahm das Bewegungsausmaß bei Erhöhung der Kaugutmen-



ge um 0,7 mm (Unterschied zwischen 2 g und 4 g) und 0,8 mm zu (Unterschied zwischen 4 g und 8 g). Kauen im Uhrzeigersinn (vom Betrachter aus) überwog, mit Verdopplung der Kaugutmenge nahm die Zahl der im Uhrzeigersinn ausgeführten Kaubewegungen stärker zu als die Zahl der gegen den Uhrzeigersinn ausgeführten (Verhältnis CW/CCW: 1,8/1 bei KGM 2 g, 2,4/1 bei KGM 4 g, 3,7/1 bei KGM 8 g) (Tab. 29).

Parameter	Veränderung mit steigender Kaugutmenge
Anzahl der Kauzyklen	Steigerung. Bei Verdopplung von 2 g auf 4 g um den Faktor 1,4; Bei Verdopplung von 4 g auf 8 g um den Faktor 1,5
Maximale Mundöffnung	Steigerung um durchschnittlich 1,5 mm
Geschwindigkeit der Unterkieferbewegung	Steigerung. 114,8 mm/s bei 2 g, 154,1 mm/s bei 4 g, 163,6 mm/s bei 8 g
Dauer eines Kauzyklus	nicht signifikant
Dauer einer Kausequenz	Steigerung
Bewegungsausmaß nach lateral	Steigerung um durchschnittlich 0,1-0,4 mm je nach Bewegungsrichtung
Bewegungsausmaß nach anterior	Steigerung um durchschnittlich 0,06 mm (zwischen 2 g und 4 g)
Bewegungsausmaß nach posterior	Steigerung um durchschnittlich 0,7 bzw. 0,8 mm
Richtung (CW/CCW)	CW überwiegt, Steigerung größer als bei CCW

**Tab. 29:** Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse.

## 5 Diskussion

### 5.1 Probandenkollektiv

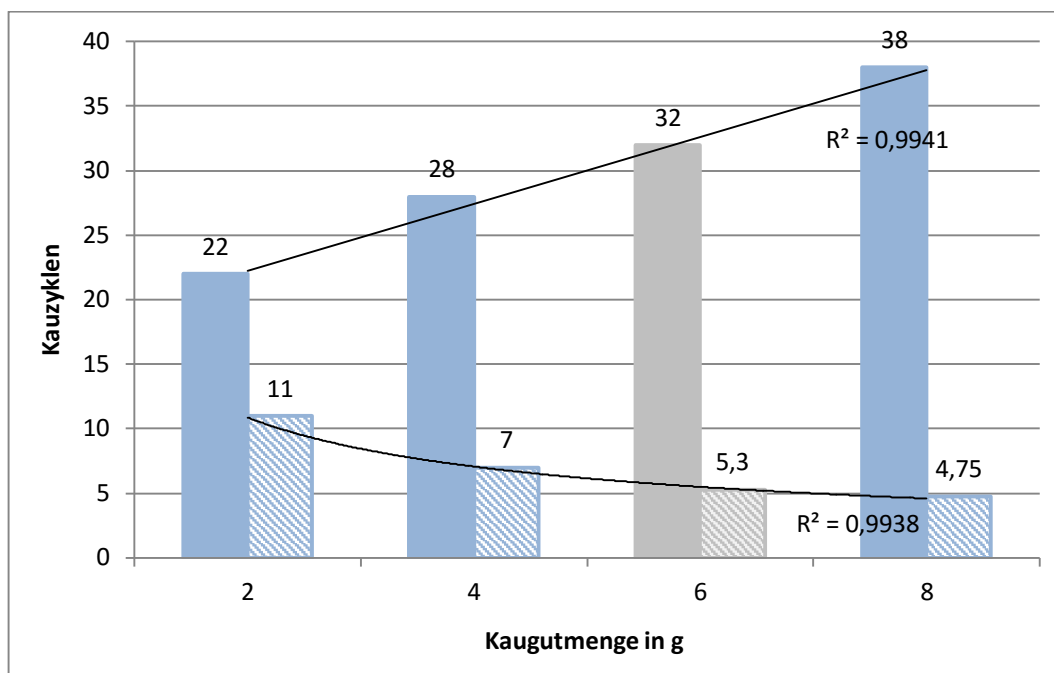
Das Probandenkollektiv der vorliegenden Studie umfasst 53 Personen und liegt damit deutlich über der gemäß Fallzahlberechnung erforderlichen Anzahl von 30 Probanden. Bei der Festlegung der Einschluss- und Ausschlusskriterien wurde besonderer Wert darauf gelegt, ein hinsichtlich der Zahngesundheit und Funktionalität des Kauorgans homogenes Probandenkollektiv junger, gesunder Erwachsener zusammenzustellen. Daraus folgt zwangsläufig, dass die Ergebnisse dieser Studie nicht repräsentativ für die Gesamtbevölkerung sind. Das Probandenkollektiv kann für künftige Studien zu diesem Thema, gleiches Studiendesign vorausgesetzt, als gesunde Kontrollgruppe dienen.

### 5.2 Abhängigkeit der Anzahl der Kauzyklen von der Kaugutmenge

Ein Ziel dieser Arbeit war es, herauszufinden, ob es bei einem zahn- und funktionsgesunden Probandenkollektiv junger Erwachsener einen allgemeingültigen Faktor gibt, um den sich die Kauzyklenzahl bei Verdopplung der Menge eines definierten Kaugutes erhöht. Die Untersuchungen ergaben, dass mit steigender Kaugutmenge die Anzahl der Kauzyklen einer Kausequenz zunimmt. Die eingangs formulierte Hypothese I („Die Kaugutmenge beeinflusst nicht die Anzahl der Kauzyklen.“) muss somit verworfen werden. Bei Verdopplung der Kaugutmenge von 2 g auf 4 g erhöht sich die Kauzyklenzahl um den Faktor 1,4; bei einer Verdopplung von 4 g auf 8 g erhöht sie sich abermals um die Hälfte (Faktor 1,5). Bei einer Vervierfachung der Kaugutmenge wird etwa die doppelte Zahl (Faktor 2,1) an Kauzyklen ausgeführt.

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass eine deutliche Abhängigkeit zwischen der Kaugutmenge und der Anzahl der Kauzyklen besteht. Zu gleichem Ergebnis kommen BLISSETT et al.<sup>13</sup>. Sie stellten fest, dass umfangreicheres Kauen erforderlich ist, um einen größeren Speisebolus für das Schlucken vorzubereiten. FORDE et al.<sup>39</sup> analysierten Videos von 15 Probanden beim Kauen unterschiedlicher Nahrung. Bei Karottenstücken von etwa 6 g verzeichneten sie im Schnitt 32 Kauzyklen. Die Resultate der vorliegenden Studie ergaben bei 2 g etwa 22 Kauzyklen, bei 4 g 28 Kauzyklen und 8 g 38 Kauzyklen. In

Abb. 28 sind die Ergebnisse von FORDE et al. in die eigenen Ergebnisse dieser Studie projiziert. Dass sich die Ergebnisse beider Studien so optimal ergänzen, kann auch als Beleg dafür dienen, dass der vor die Frontzähne geklebte Registriermagnet den Kauvorgang der Probanden nur unwesentlich beeinflusst hat.



**Abb. 28:** Zunahme der Kauzyklen bei steigender Kaugutmenge und Abnahme der Kauzyklen pro ein Gramm Kaugut bei steigender Kaugutmenge. In Blau dargestellt sind die Ergebnisse dieser Studie, in Grau die Werte von FORDE et al.<sup>39</sup>. Durch sie sind lineare bzw. potenzielle Trendlinien gelegt. Die einfarbigen Säulen zeigen die annähernd lineare Steigerung der Kauzyklen mit der Kaugutmenge (Zunahme: 6 Zyklen von 2 g auf 4 g, 5 Zyklen von 4 g auf 6 g und 5 Zyklen von 6 g auf 8 g), die schraffierten Säulen verdeutlichen die sinkende Zahl von Kauzyklen pro ein Gramm Kaugut bei steigender Kaugutmenge.  $R^2$  ist das Bestimmtheitsmaß der Trendlinie.

LUCAS und LUKE<sup>98</sup> ließen in einer Studie sechs Probanden verschiedene Mengen Erdnüsse kauen, ermittelten die Kauzyklenzahl und analysierten die finale Partikelgröße mithilfe der Siebmethode. Sie stellten fest, dass die Zahl der Kauzyklen mit steigender Kaugutmenge zunimmt, die Kauzyklenzahl pro Gramm jedoch abnimmt. Mit der Beobachtung, dass kleinere Kaugutmengen ausgiebiger gekaut werden, unterstützt die vorliegende Untersuchung die Ergebnisse dieser Studie. Eine potenzielle Trendlinie beschreibt den negativ exponentiellen Verlauf der Daten dieser Studie (Bestimmtheitsmaß  $R^2=0,9981$ , Abb. 28). Auch die Daten von FORDE et al. liegen hier im Bereich der Trendlinie. Aufgrund dessen, dass im Verhältnis weniger Kauzyklen durchgeführt werden, scheint vom zeitlichen Aspekt her das Kauen größerer Kaugutmengen bis zu einer bestimmten Menge effektiver zu sein. Nach Überschreitung einer individuellen Grenzmenge wird das Kauen

wieder langsamer und die Zahl der Kauzyklen steigt im Verhältnis an <sup>98</sup>. Grund dafür ist, dass bei sehr großen Kaugutmengen die Unterkieferbewegungen sowie die Bewegungen der Weichgewebe durch die starke Füllung des Mundes behindert werden, sodass ein Aufeinanderbeißen der Zahnreihen nicht mehr möglich ist. Zudem ist zur Befeuchtung der Nahrung eine größere Menge an Speichel gefordert, was nur mit mehr Zeit zu bewältigen ist <sup>93</sup>.

Zum Prozess der Zerkleinerung und der finalen Partikelgröße existieren unterschiedliche Auffassungen. YURKSTAS <sup>197</sup> hielt fest, dass kleinere Kaugutmengen in kleineren Partikeln geschluckt werden als größere. Als Grund führt er an, dass ein kleiner Bolus zu einem größeren Teil zwischen den Zähnen platziert werden kann, was damit die Intensität der Zerkleinerung erhöht. LUCAS und LUKE <sup>97-99</sup> registrierten zwischen den Kaugutmengen 5 g, 8 g und 12 g keine signifikanten Unterschiede in der Größe der schluckbereiten Partikel. Zur Erklärung führen sie zwei mögliche Gründe an: Zum einen ist nicht nur die finale Partikelgröße, sondern auch die Befeuchtung mit Speichel ein notwendiges Schluckkriterium. Kleinere Kaugutmengen werden daher vermutlich deshalb relativ gesehen länger gekaut, weil immer eine gewisse Zeit für die Durchspeichelung der Partikel erforderlich ist. Zum anderen, so folgern sie, rührt die ähnliche Partikelgröße (der Karotten) wahrscheinlich auch daher, dass es bei kleineren Kaugutmengen für Zunge und Wangen schwerer ist, die Nahrung zwischen den Zähnen zu platzieren. BLISSETT et al. <sup>13</sup> geben ebenfalls an, dass am Ende einer Kausequenz die Partikelgröße ungeachtet der anfänglichen Kaugutmenge gleich ist. Sie beobachteten, dass größere Speiseboli intensiver gekaut werden, um sie für das Schlucken vorzubereiten (Erhöhung der Anzahl an Kauzyklen und Gesamtkaudauer). MISHELLANY et al. <sup>111</sup> stellten fest, dass die Partikelgröße direkt vor dem Schlucken hauptsächlich durch die Art des Kaugutes determiniert ist. Individuell werden Speisen ähnlicher Beschaffenheit in nahezu gleicher Partikelgröße geschluckt und auch inter-individuell ist die finale Partikelgröße ähnlich. Um dies zu erreichen, werden Kauzyklenzahl und Kaudauer variiert. Die Autoren postulieren, dass ein festgelegter Zerkleinerungsgrad bestehen muss, bevor der Schluckvorgang eingeleitet wird. Um dieses Ziel zu erreichen, besitzt jeder Mensch eine individuelle Kaustrategie. Man scheint somit davon ausgehen zu können, dass bei identischem Kaugut trotz unterschiedlicher initialer Menge bei uneingeschränkter Kaufunktion die Größe der geschluckten Partikel gleich ist. Demzufolge müsste auch bei vorliegender Studie trotz Variation der

Kaugutmenge die Größe der geschluckten Partikel bei allen Durchgängen gleich gewesen sein. Auch die visualisierten Bewegungsbahnen dieser Studie zeigen, dass jeder Proband unabhängig von der Kaugutmenge ein konstantes, individuelles Kaumuster besitzt. Das Kaumuster änderte sich bei zunehmender Kaugutmenge (Zyklenzahl stieg, Bewegungsamplituden nahmen zu), es blieb aber insgesamt charakteristisch für den Probanden. Da bei der vorliegenden Studie methodenbedingt nicht der Zerkleinerungsgrad des zum Schlucken vorbereiteten Speisebolus bestimmt wurde, kann nicht beantwortet werden, ob Probanden deren Kausequenzen deutlich weniger Kauzyklen als der Durchschnitt aufwiesen, effizienter kauten oder das Schlucken bei größerer Partikelgröße eingeleitet wurde.

Für den Zeitpunkt des Schluckes spielt vermutlich auch die bis dahin produzierte Menge und Viskosität des Speichels eine wesentliche Rolle. Bei gesunden Personen wird die Produktionsrate bei Nahrungsaufnahme gesteigert, die Viskosität des Speichels wird niedriger. Verminderte Speichelproduktion kann krankheitsbedingt, therapiebedingt durch Medikamente und Bestrahlung sowie altersbedingt auftreten <sup>186</sup>. Daher ist anzunehmen, dass auch aufgrund des Alters zwischen vollbezahnten Personen Unterschiede in der Kauzyklenzahl bestehen können.

„Kaeffizienz“ beschreibt die Fähigkeit mit minimalem Energieaufwand, das heißt mit möglichst geringem Aufwand an Muskelaktivität den Speisebolus zu zerkleinern und einzuspeicheln. „Kaumuster“ ist nicht mit Kaeffizienz gleichzusetzen. Der Unterkiefer wird so gegen den Oberkiefer geführt, dass die Zähne gemäß ihrer Stellung, Größe und okklusalen Ausformung den Speisebolus optimal zerkleinern können. Unterkiefer- und Zungenbewegungen dienen zudem dazu, die Speisepartikel immer wieder auf die Kauflächen zurück zu transportieren. Das Kaumuster ist somit Resultat des Zusammenspiels der oralen Strukturen in dem Bestreben eine möglichst hohe Kaeffizienz zu erreichen. Es stellt sich die Frage, ob von verminderter Kaeffizienz auf eine eingeschränkte Mundgesundheit wie Zahnlücken, mangelhaft sitzende Prothesen, Schmerzen in Mundraum, Muskulatur oder Kiefergelenken geschlossen werden kann. Nicht nur physiologische Aspekte sondern auch psychische, wie gewohnheitsmäßiges Schlucken größerer Nahrungspartikel, können das Kauen beeinflussen. Um die Frage nach der Therapiebedürftigkeit in Hinsicht auf die Versorgung mit Nährstoffen klären zu können, muss vorab verifiziert werden, inwieweit der Grad der Nahrungszerkleinerung für die Nahrungsaufnahme von Bedeutung ist. LOPEZ-

JOURNET et al.<sup>92</sup> sehen eher zwischen Unterernährung und hohem Alter oder Unterbringung in Heimen eine Verbindung als zwischen Unterernährung und dem Gebisszustand. Eine Studie, die stichhaltig belegt, dass ein Zusammenhang zwischen stark reduzierten Zahnzustand und einer kürzeren Lebenserwartung besteht, existiert bislang nicht. In etlichen Studien kamen Forscher jedoch zu dem Ergebnis, dass ein Zusammenhang zwischen funktionell unzureichendem Gebissbefund und dem Risiko für defizitäre Ernährung besteht<sup>9, 26-28, 106, 112, 124, 142</sup>. Zudem wird eine Verbindung zwischen reduzierter Kaufähigkeit und gastrointestinalen Symptomen beschrieben<sup>16</sup>. Für einen schlechten Ernährungszustand bei mangelhaftem Gebisszustand werden mehrere Gründe angegeben: Die Nahrungszerkleinerung ist reduziert, die Speichelsekretion sinkt, somit verschlechtert sich die Bolusbildung und enzymatische Nährstoffumwandlung. Hierdurch wird nicht nur der Schluckakt erschwert, sondern auch die Magensaftseznierung verringert, wodurch die Nährstoffresorption herabgesetzt sein kann<sup>22</sup>. Des Weiteren weisen Menschen mit unzureichendem Gebisszustand häufig eine einseitige Ernährung auf. Weichgekochte oder pürierte Nahrung wird bevorzugt, kauintensivere gemieden. Der Verzehr von Obst, Gemüse und langkettigen Kohlenhydraten sinkt<sup>34, 154, 161</sup>. Der optische und geschmackliche Reiz der Mahlzeiten ist gering, wodurch die Freude am Essen abnimmt. Es kommt zu Vitamin-, Mineral- und Ballaststoffmangel<sup>23, 25, 105, 116, 127, 128, 135, 185</sup>. Uneinigkeit besteht in der Frage, wie der Gebisszustand mit der täglichen Energiezufuhr zusammenhängt. Der vorwiegende Anteil der Studien zum Ernährungszustand von Personen mit schlechter zahnärztlicher Versorgung besagt, dass ein desolater Gebisszustand mit Gewichtsverlust und Unterernährung sowie reduzierter Muskelmasse einhergeht<sup>25, 29, 74, 108, 109, 116, 142, 168, 169</sup>. Wenige beobachteten hingegen eine Gewichtszunahme<sup>81, 151</sup>. Das Erkennen von reduzierter Kaeffizienz ist somit für Prävention und Therapie von Mangelercheinungen und Krankheiten von großer Bedeutung. Die prothetische Rehabilitierung des Kauorgans führt allerdings nicht zwangsläufig zu einer gesünderen Ernährungsweise. MC KENNA et al. sowie MOYNIHAN et al.<sup>109, 119</sup> stellten fest, dass keine statistisch signifikanten Änderungen der Blutwerte auszumachen waren. Dies kann mit Beibehalten der schon in jungem Alter angewöhnten oder an den vorherigen, schlechten Gebisszustand angepassten Ernährungsweise erklärt werden. Daher sollte im Optimalfall eine prothetische Neuversorgung mit einer individuellen Ernährungsberatung einhergehen.

Stellt man die Frage nach der Versorgungsnotwendigkeit von gering lückenhaften Gebissen, so lässt sich diese häufig schon wegen drohender Kippung oder Elongation schlecht abgestützter Zähne bejahen. Vermutlich ist die Kaueffizienz entsprechender Personen nicht oder nur wenig reduziert. Hinreichend erforscht ist dies jedoch nicht.

Immer wieder wird das Konzept der Prämolarenokklusion diskutiert. In der täglichen zahnmedizinischen Praxis werden nicht automatisch alle fehlenden Zähne ersetzt, viele Menschen kommen ohne Molaren gut zurecht. Vor allem einseitige Freidendprothesen werden in vielen Fällen nicht getragen. Besonders KÄYSER<sup>70</sup> widmete seine Forschung diesem Thema. Er hielt fest, dass keine klinisch signifikanten Unterschiede in der Kaufähigkeit, dem Auftreten temporomandibulärer Funktionsstörungen, in Zahnwanderungen und in oralem Komfort zwischen Personen mit verkürzter Zahnreihe und anderen mit vollständigen Zahnreihen bestünden. Die verkürzte Zahnreihe erfülle somit die Anforderungen einer funktionellen Dentition. Forschungsergebnisse der Arbeitsgruppe RUES, SCHINDLER, TÜRPEL, LENZ und SCHWEIZERHOF<sup>78</sup> zeigen jedoch, dass die Summe der Muskelkräfte und Gelenkbelastungen bei identischer Beißkraft bei bilateraler Molarenabstützung die geringsten Beträge aufweisen. Daraus folgt, dass eine bilaterale oder unilaterale Molarenabstützung im Vergleich zur verkürzten Zahnreihe eine signifikant geringere Belastung von Muskeln und Gelenken hervorruft. Ihrer Meinung nach ist die molarengestützte Okklusion die biomechanisch effizienteste Okklusionsform. Ergebnisse einer Untersuchung von TANASIC et al.<sup>175</sup> zu Kräften in Kiefermodellen unterstützen diese Auffassung. Dennoch wird in der Literatur die Prämolarenokklusion überwiegend als vielversprechend in Funktionalität, Patientenzufriedenheit und Kosteneffektivität ohne erhöhtes Risiko für temporomandibuläre Dysfunktionen beschrieben<sup>35, 73, 149</sup>. Ein Schlüssel für das Funktionieren einer Prämolarenokklusion besteht vermutlich in dem neurophysiologischen Phänomen, dass mit Verlust der Molaren die beim Kauen generierten Muskelkräfte herunterregelt werden und dient wahrscheinlich dem Schutz der Kiefergelenke und Restbe-zahnung.

Um feine Abstufungen im Kauverhalten feststellen zu können, reichen Tests mit grobem Einstufen nach Zerkleinerungsgrad oder das Zählen von Kauzyklen nicht aus. Es gilt, auch andere Parameter wie die Bewegungsamplituden beim Kauen in vertikaler, transversaler

und sagittaler Dimension sowie die Geschwindigkeiten der Kieferbewegung und die Dauer einer Kausequenz zu analysieren.

### 5.3 Abhängigkeit der maximalen Mundöffnung von der Kaugutmenge

Die Ergebnisse zeigten, dass sich die Amplitude der Mundöffnung mit steigender Kaugutmenge erhöht. Die eingangs formulierte Hypothese II („Es besteht keine Abhängigkeit zwischen der Kaugutmenge und der vertikalen Amplitude der Unterkieferbewegung (maximale Mundöffnung).“) wurde somit widerlegt. Die Steigerung ist negativ exponentiell, da sie relativ gesehen von 2 g auf 4 g größer ist als von 4 g auf 8 g.

Dass die Mundöffnung mit zunehmender Größe des Speisebolus ansteigt, liegt nahe und wird auch durch die Studien verschiedener Autoren belegt<sup>12, 13, 31, 114, 139, 163, 164, 183, 192</sup>. Jede Mundöffnung wird der aktuellen Bolusgröße angepasst, sodass sie nur geringfügig größer als der Durchmesser des Kaugutes ist<sup>114, 163</sup>. VAN DER BILT et al.<sup>183</sup> zeigten, dass bei kleinen Kaugutmengen die Mundöffnung ähnlich des größten Durchmessers des Bolus ist. Große Boli werden so ausgerichtet, dass die maximale Mundöffnung dem kleinsten Durchmesser angepasst werden kann. In der vorliegenden Studie wurde zu Beginn jedes Durchganges das Karottenstück hochkant auf der Zunge des Probanden platziert. So waren sowohl bei Kaugutmenge 2 g (Abmessungen: 2 cm x 0,7 cm, Volumen: 2,2 cm<sup>3</sup>) und Kaugutmenge 4 g (Abmessungen: 2 cm x 1,4 cm, Volumen: 4,4 cm<sup>3</sup>) die Karottenstücke bereits nach diesem Kriterium ausgerichtet. Im Falle der Kaugutmenge 8 g (Abmessungen: 2 cm x 2,8 cm, Volumen: 8,8 cm<sup>3</sup>) wurde der Bolus wahrscheinlich zu Beginn des ersten Kauzyklus von der Zunge quer auf den Zähnen platziert. Dies würde erklären, weshalb die maximale Mundöffnung negativ exponentiell steigt. Die Ergebnisse für den Durchschnitt der maximalen Mundöffnungen während eines Kauzyklus von 15,7 mm bei einem Bolus von 2 g, 17,3 mm bei 4 g und 18,8 mm bei 8 g zeigen zudem, dass im Bereich der kleineren Kaugutmengen von 2 g und 4 g der Unterkiefer nicht nur so viel wie nötig, sondern etwas weiter geöffnet wird. Möglicherweise, um der Zunge bei ihren sortierenden Bewegungen genügend Raum zu geben. Bei dem großen Speisebolus vom Gewicht 8 g scheint dieser Spielraum in der Mundöffnung ausgereizt zu sein. Im Gegensatz zu den beiden anderen Kaugutmengen zeigt hier der Durchschnittswert der Öff-



nungsamplitude, dass die kleinste Abmessung während einer Kausequenz selten überstiegen wird.

Während der ersten Kauzyklen ist die Zerkleinerung des Speisebolus sehr hoch, sodass die Amplitude der Mundöffnung zu Anfang am stärksten sinkt. Die Zyklen des weiteren Kaugvorganges ähneln sich stark <sup>12, 90, 163, 164</sup>. Unterschiede in der Öffnungsamplitude bei unterschiedlichen Kaugutmengen zeigen sich demnach zu Beginn einer Sequenz am deutlichsten.

BHATKA et al. sowie BLISSETT et al. <sup>12, 13</sup> bemerkten weiterhin, dass die Steigerung nicht linear ist, sondern im Bereich größerer Kaugutmengen kleiner wird. Gleiches zeigen auch die Ergebnisse der vorliegenden Studie. Letztere Autoren folgerten, dass beim Kauen größerer Mengen bilaterales Kauen zunimmt.

PRINZ <sup>143</sup> präziserte, dass sich dabei unterschiedliche Anteile des Kaugutes nicht zwischen den Zahnreihen, sondern im Vestibulum befinden. Sie werden vorübergehend nicht manipuliert, somit ist ihr Einfluss auf die Mundöffnung zu diesem Zeitpunkt reduziert. Der Abstand der Zahnreihen ist hierbei nicht von der gesamten Kaugutmenge, sondern von der aktuellen Partikelgröße abhängig. Die Schlussfolgerung der Autoren bedarf einer kritischen Betrachtung, denn es wirft sich die Frage auf, ob sich das von ihnen verwendete Kaugut Kaugummi überhaupt bilateral verteilt. Bei Verwendung von Karotten als Kaugut, mit tatsächlich geringerer Bolusbildung, erscheint dieser Schluss allerdings als recht plausibel und die Daten der vorliegenden Studie bestätigen die früheren Beobachtungen von PRINZ.

#### **5.4 Abhängigkeit der Bewegungen in transversaler Richtung von der Kaugutmenge**

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen, dass Lateralbewegungen mit steigender Kaugutmenge größer werden. Zudem wurde ersichtlich, dass während Schließbewegungen stärkere Lateralbewegungen durchgeführt werden als bei Öffnungsbewegungen. Dabei ist das Bewegungsausmaß zur linken Seite hin durchschnittlich größer als zur rechten Seite hin.

Im internationalen Schrifttum herrscht Uneinigkeit hinsichtlich der Frage, ob das laterale Bewegungsausmaß von der Kaugutmenge abhängt. LUCAS et al.<sup>99</sup> beobachteten, dass laterale Kieferbewegungen in einem etwa konstanten Bereich schwanken und dass weder die Art des Kaugutes noch die Kaugutmenge einen Einfluss haben. Im Gegensatz dazu zeigen die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit übereinstimmend mit SHIGA et al. sowie BHATKA et al.<sup>12, 164, 192</sup> eine positive Korrelation mit der Kaugutmenge. SHIGA et al. vermuteten, dass die Ursache dieser differierenden Meinungen in methodischen Unterschieden liegen und präsentierten zwei mögliche Gründe: Während LUCAS et al. natürliches Kaugut (Erdnüsse) verwendeten, welches seine Konsistenz und Größe während des Kauens verändert, nutzten sie Kaugummi gleichbleibender Beschaffenheit. Zum einen werden anfängliche, größere Kauzyklen beim Verzehr von Erdnüssen durch kleinere Zyklen bei Fortschreiten einer Kausequenz relativiert, Kaugummi hingegen ist durch eine ganze Kausequenz hinweg von identischer Bolusgröße. Zum anderen sind Erdnüsse hart und zerbrechlich und benötigen ausgeprägte vertikale Bewegungen. Kaugummi hingegen, welches weich und viskos ist, benötigt laterale Bewegungen, welche vermutlich mehr von der Kaugutmenge beeinflusst werden als vertikale<sup>164</sup>. In den Ergebnissen der vorliegenden Studie ist eine positive Korrelation mit der Kaugutmenge bei Verwendung natürlichen Kaugutes zu sehen. Der Grund für fehlende Übereinstimmung mit LUCAS et al. könnte die unterschiedliche Darreichungsform des Kaugutes sein. LUCAS et al. konnten bei ihrem Kaugut keine großen Stücke anbieten, da Erdnüsse von begrenztem Durchmesser sind. Ihnen blieb nur die Erhöhung der Stückzahl, was zwar das Gewicht, nicht aber die Teilchengröße veränderte. In der vorliegenden Studie blieb die Stückzahl gleich, verändert wurden das Gewicht und damit auch das Volumen der Karottenstücke. Dies deutet darauf hin, dass bei der Kaugutmenge nicht das Gewicht, sondern das Volumen das Bewegungsausmaß beeinflusst.

BHATKA et al.<sup>12</sup> gehen davon aus, dass das Kauzentrum im Hirnstamm nicht dafür ausgelegt ist, die vertikalen und lateralen Exkursionen separat zu kontrollieren. Das bedeutet, dass als Reaktion auf größere Speiseboli die Bewegungen in allen drei Raumebenen größer werden. Anschaulich bestätigen dies die visualisierten Bewegungsbahnen der vorliegenden Studie. Das Kaumuster änderte sich bei zunehmender Kaugutmenge durch Ansteigen der Zyklenzahl und Zunahme der Bewegungsamplituden, es blieb aber insgesamt cha-

rakteristisch für den Probanden, indem die Form der einzelnen Kauzyklen annähernd gleich blieb.

Sowohl AHLGREN, BATES et al. als auch NEILL et al.<sup>2, 11, 122</sup> schreiben, dass die Öffnungsbahn eines Kauzyklus in der Mittellinie liegt und das Schließen weiter lateral auf der Kauseite stattfindet. Der Unterkiefer startet einen Kauzyklus mit einer vertikalen Bewegung nach kaudal, wobei die zentrischen Höcker die antagonistischen Gruben und Randleisten verlassen. Anschließend schwenkt er zur Arbeitsseite und bewegt sich bogenförmig wieder an den Oberkiefer heran, während die konvex geformten Scher- und Stampfhöcker die Nahrungsteile zerschneiden und zerquetschen. Hierbei dienen die Fissuren als eine Art Einflugschneise<sup>95</sup>. Dies bestätigen die Ergebnisse von ELLERBROCK<sup>33</sup> und OGAWA et al.<sup>129</sup> et al.: ELLERBROCK maß und verglich initiale Tangentenwinkel exkursiver Bewegungsanteile zahngeführter Grenzbewegungen mit denen des freien Kauens mithilfe des JMA-Systems. Er registrierte, dass die Bewegungsbahn beim Öffnen wenig okklusal beeinflusst wird. OGAWA et al. ermittelten ebenfalls unter Verwendung eines dreidimensionalen Unterkieferbewegungs-Analyse-Systems den Einfluss der okklusalen Führung auf den Verlauf der inkursiven Kaubewegungsbahn. Ihre Messungen ergaben, dass die terminale Schließbewegung stark durch die okklusale Führung bestimmt wird. Eine Begründung für dieses Phänomen liefern YAMASHITA et al.<sup>194</sup>, welche herausfanden, dass Kaubewegungen umso effektiver sind, je weiter sie nach lateral ausschwenken. Sie erklären dies mit einem Intensivieren der Gleitkontakte, was die Stampfwirkung der Seitenzähne verstärkt. Diese Beobachtung bestätigt sich in der vorliegenden Arbeit, in mehrheitlich die Schließbewegung weiter lateral als die Öffnungsbewegung verlief.

Wie bereits erwähnt, ist den Ergebnissen der vorliegenden Studie abzulesen, dass beim Öffnen und Schließen das Bewegungsausmaß zur linken Seite hin größer war als zur rechten. Als Begründung kommt eine Lateralität des Kauens in Frage, also das Vorhandensein einer bevorzugten Kauseite. Den Ergebnissen zufolge müsste diese somit die linke Seite sein. Dennoch scheint Links nicht die mehrheitlich präferierte Kauseite zu sein, denn Übereinstimmung mit Angaben aus der Literatur, weiteren Ergebnissen dieser Arbeit wie der Kaurichtung oder Aussagen der Probanden findet sich nicht. Rechts wird in der Literatur<sup>13, 107, 126, 184, 198</sup> mehrheitlich als die von den meisten Menschen präferierte Kauseite genannt. Der Grund für Differenzen im lateralen Bewegungsausmaß bleibt vorerst offen.

## **5.5 Abhängigkeit der Bewegungen in sagittaler Richtung von der Kaugutmenge**

Die Bewegungen nach anterior und posterior vergrößern sich mit steigender Kaugutmenge. Je weiter der Mund bei steigendem Kaugutvolumen geöffnet werden muss, desto länger ist die Bewegungsbahn, welche der Inzispunkt nicht nur in vertikaler, sondern auch in sagittaler Richtung beschreibt. Gleichzeitig muss mit zunehmendem Volumen des Kaugutes sowohl von Zunge, Lippen und Wangen ein größerer Aufwand betrieben werden, um den Speisebolus auf die Kauflächen zu befördern und den optimalen Kaukraftvektor für das Zerbeißen einzustellen. Beim Kauen versucht die Muskulatur, den Unterkiefer so einzustellen, dass er über den Speisebolus bestmöglich ausbalanciert wird. Dies erklärt die positive Korrelation von Kaugutmenge und sagittalem Bewegungsausmaß, welche sowohl in den Ergebnissen von BHATKA et al., BLISSETT et al., als auch WINTERGERST et al.<sup>12, 13, 192</sup> zu finden ist. Auch die Daten der vorliegenden Arbeit decken sich weitgehend mit ihren Ergebnissen. Die Autoren betrachten die zurückgelegte Bewegungstrecke allerdings nur in der Sagittalen, ohne zwischen Bewegungen anterior und posterior der Schlussbissposition zu differenzieren. In der vorliegenden Arbeit hingegen werden diese Bewegungsrichtungen getrennt betrachtet. Beim Bewegungsausmaß nach anterior findet man äußerst niedrige Werte. Es besteht eine signifikante Abhängigkeit zwischen Kaugutmenge 2 g und 4 g, nicht aber zwischen 4 g und 8 g. Somit kann nicht mit Bestimmtheit von einer Steigerung des Bewegungsausmaßes nach anterior mit steigender Kaugutmenge ausgegangen werden. Die Bewegung nach posterior fällt größer aus. Die Unterschiede sind zwischen allen Kaugutmengen signifikant. Dies ist insofern plausibel, als dass bei großen wie kleinen Kaugutmengen die Bewegungskomponente durch die Dreh-Gleit-Bewegung im Kiefergelenk bestimmt wird. Je weiter der Mund geöffnet wird, desto mehr bewegt sich der Inzispunkt nach kaudal und posterior, wodurch sich mit zunehmender Kaugutmenge das Bewegungsausmaß nach posterior signifikant verändert.

## **5.6 Abhängigkeit der Geschwindigkeit und der Dauer der Kaubewegungen von der Kaugutmenge**

### **5.6.1 Abhängigkeit der Geschwindigkeit sowie Dauer eines Kauzyklus von der Kaugutmenge**

Die Geschwindigkeit der Kaubewegungen des Unterkiefers nahm in den Versuchen der vorliegenden Studie mit steigender Kaugutmenge zu. Dabei war die Geschwindigkeit der Öffnungsbewegung höher als die der Schließbewegung. Es lag keine proportionale Steigerung vor. Bezogen auf das Gewicht des Kaugutes war die Steigerung zwischen 2 g und 4 g größer als zwischen 4 g und 8 g. Für die Dauer eines Kauzyklus ergab die statistische Analyse keine signifikante Abhängigkeit von der Kaugutmenge.

Zu dem Ergebnis, dass sich die Geschwindigkeit erhöht und die Dauer eines Kauzyklus trotz Steigerung der zu kauenden Menge nahezu konstant bleibt, kamen ebenfalls SHIGA et al.<sup>164</sup> sowie BHATKA et al.<sup>12</sup>. Sie vermuteten, dass das Beibehalten der Dauer eines Kauzyklus darauf zurück zu führen ist, dass der Kaurhythmus hauptsächlich vom Kauzentrum/„pattern generator“ im Hirnstamm bestimmt wird. Dadurch werden Dauerparameter weniger anfällig für peripheres Feedback als Streckenparameter. Größere zurückzulegende Distanzen aufgrund höherer Kaugutmengen werden durch Beschleunigung der Kieferbewegung ausgeglichen<sup>12, 164</sup>. Darüber hinaus könnten aber auch psychische Einflüsse, wie der Wille, trotz größerer zu kauender Menge in absehbarer Zeit schluckbereit zu sein, Grund für die Steigerung der Kaugeschwindigkeit sein.

Wenngleich die statistische Auswertung keine signifikanten Unterschiede in der durchschnittlichen Dauer eines Kauzyklus mit Erhöhung der Kaugutmenge ergab, ist den Mittelwerten sowie Medianen eine moderate Steigerung der Zyklendauer zu entnehmen. Ursache der leichten Steigerung ist möglicherweise der Einfluss einiger Zyklen zu Beginn einer Sequenz, weil hier teilweise langsame „Sortierbewegungen“ ausgeführt werden, welche bei größeren Kaugutmengen komplexer sind und länger dauern. Bei Errechnung der durchschnittlichen Zyklendauer können somit diese ersten Kauschleifen zu leicht steigenden Werten bei Erhöhung der Kaugutmenge geführt haben. In dieser Phase wird der Ursprungsbolus bereits stark zerkleinert, daher kann in den folgenden Zyklen die Amplitude der Mundöffnung wesentlich reduziert werden, die Strecke verringert sich, die Kaugeschwindigkeit wird erhöht.

Trotz unterschiedlicher Studiendesigns decken sich die Werte der vorliegenden Arbeit zur Geschwindigkeit der Unterkieferbewegungen in Annäherung mit den Daten anderer Studien. Die Auflistung in Tab. 30 soll dies deutlich machen. Die Geschwindigkeit war bei den Untersuchungen aus den Jahren 1982-2010 im Bereich zwischen etwa 66 und 126 Millimetern pro Sekunde, damit liegen die Resultate der vorliegenden Studie im Mittelfeld.

Studie	Geschwindigkeit der Unterkieferbewegung (in mm/s)	Geschwindigkeit der Öffnungsbewegung (in mm/s)	Geschwindigkeit der Schließbewegung (in mm/s)
PRÖSCHEL et al. <sup>147</sup>		65,9	81,6
ANDERSON et al. <sup>5</sup>	125,8 (hartes Kaugut) 101,1 (weiches Kaugut)		
FARIAS-GOMEZ et al. <sup>36</sup>	118,4 (einseitig kauende Probanden) 122,1 (beidseitig kauende Probanden)		
BUSCHANG et al. <sup>18</sup>	75,9 (Frauen) 95,5 (Männer)		
JEMT et al. <sup>67</sup>		84,0	70,0
HOWELL et al. <sup>61</sup>		83,0	79,0
Eigene Studie		101,2 (2 g Kaugutmenge) 108,0 (4 g) 114,9 (8 g)	77,4 (2 g Kaugutmenge) 83,3 (4 g) 88,1 (8 g)

**Tab. 30:** Ergebnisse verschiedener Studien zur durchschnittlichen Geschwindigkeit der Kaubewegungen.

Die unterschiedlichen Messergebnisse lassen sich auf die verschiedenen Methoden zurückführen. So kann zum einen die unterschiedliche Konsistenz der Testnahrungsmittel, welche zum Teil nicht näher spezifiziert sind, die Ergebnisse beeinflusst haben <sup>180</sup>. Diverse Autoren verwendeten dabei künstliches Kaugut <sup>5, 12, 18, 36, 87, 138, 164, 174</sup>. Andere Unterschiede bestehen darin, dass einige nur einen Teil der Kauzyklen analysierten (SHIGA et al. <sup>164</sup>, BHATKA et al. <sup>12</sup>, BUSCHANG et al. <sup>18</sup>), die Kauzyklenzahl einschränkten (HOWELL et al. <sup>62</sup>, TAKADA et al. <sup>174</sup>, ANDERSON et al. <sup>5</sup>, FARIAS-GOMEZ et al. <sup>36</sup>, PEYRON et al. <sup>138</sup>, LEPLEY et al. <sup>87</sup>) oder eine Kaudauer vorgaben (PRÖSCHEL et al. <sup>146</sup>, BHATKA et al. <sup>12</sup>). Versuche mit vorgegebener Kauzyklenzahl führen möglicherweise zu langsamerem Kauen, folglich dauerte ein durchschnittlicher Zyklus länger. Bei Analysen, die nur ausgesuchte Zyklen berücksichtigen, kann die durchschnittliche Kauzyklen-

dauer verlängert sein, da kleine Bewegungen am Ende eines Kauvorganges nicht in die Berechnung einfließen.

Die Dauer einer durchschnittlichen Öffnungsbewegung (0,39-0,40 s) und Schließbewegung (0,39-0,41 s) in den Versuchen dieser Studie liegt im Ergebnisbereich weiterer Studien (Tab. 31). Sehr gut entsprechen die Werte denen von BHATKA et al.<sup>12</sup>, welche zwar künstliches Kaugut (Kaugummi) verwendeten, aber ebenfalls eine Studie zu Kaugutmenngen von 2 g, 4 g und 8 g durchführten.

Studie	Dauer eines Kauzyklus (in s)	Dauer der Öffnungsbewegung (in s)	Dauer der Schließbewegung (in s)
PRÖSCHEL et al. <sup>146</sup>	0,72 (weiches Kaugut) 0,88 (hartes Kaugut)	0,34 0,43	0,38 0,45
BHATKA et al. <sup>12</sup>	0,75 (1 g Kaugummi) 0,77 (2 g) 0,75 (4 g) 0,79 (8 g)	0,45 0,45 0,43 0,45	0,30 0,32 0,33 0,34
ANDERSON et al. <sup>5</sup>	1,13 (hartes künstliches Kaugut) 1,0 (weiches künstliches Kaugut)		
LEPLEY et al. <sup>87</sup>	0,75		
BUSCHANG et al. <sup>18</sup>	0,97 (Frauen) 0,84 (Männer)		
PEYRON et al. <sup>138</sup>		56,2-62,0 (je nach Kauguthärte)	46,6-50,0 (je nach Kauguthärte)
TAKADA et al. <sup>174</sup>	0,67 (hartes Kaugut), 0,63 (weiches Kaugut)		
SHIGA et al. <sup>164</sup>	0,493		
JEMT et al. <sup>67</sup>	0,52 (Knäckebrötchen) 0,47 (Karotten)		
HOWELL et al. <sup>61, 62</sup>	0,92		
Eigene Studie	0,78 0,79 0,81	0,39 0,39 0,40	0,39 0,40 0,41

**Tab. 31:** Messergebnisse verschiedener Studien zur durchschnittlichen Dauer eines Kauzyklus.

Übereinstimmend mit HOWELL et al.<sup>61, 62</sup>, JEMT et al.<sup>67</sup> und auch PEYRON et al.<sup>138</sup> sowie BHATKA et al.<sup>12</sup> waren die Geschwindigkeit und Dauer der Öffnungsbewegung höher als die der Schließbewegung. Erklärbar ist die längere Zeit beim Schließen damit, dass hier nicht nur eine freie Kieferbewegung, sondern zusätzlich noch der „power stroke“ zum Zerquetschen der Nahrung mit einhergehender Abbremsung und sensomotorischer

Feinregulierung stattfindet. PRÖSCHEL et al.<sup>146</sup> kamen zu gegensätzlichem Ergebnis. Wie BHATKA et al. ließen die Autoren allerdings einseitig kauen und analysierten keinen vollständigen Kauvorgang.

Interindividuell besteht hinsichtlich der Geschwindigkeit und Dauer der Kaubewegungen eine hohe Variabilität, die Standardabweichungen lagen zwischen 13,4 mm/s und 31,4 mm/s. Dies zeigt, dass die Geschwindigkeit nicht nur von der Kaugutmenge abhängig ist, sondern in großem Maße auch von den individuellen Gewohnheiten und der Physiologie jedes Probanden bestimmt wird.

### **5.6.2 Abhängigkeit der Dauer einer Kausequenz von der Kaugutmenge**

Mit steigender Kaugutmenge nahm die Gesamtdauer einer Kausequenz zu. Wie in Kapitel 5.6.1 beschrieben, hatten die Kaugutmengen nur einen minimalen Einfluss auf die Dauer eines einzelnen Kauzyklus. Da die Anzahl der Kauzyklen jedoch mit steigender Kaugutmenge nachweislich zunimmt<sup>39,99</sup>, steigt die Gesamtdauer einer Kausequenz.

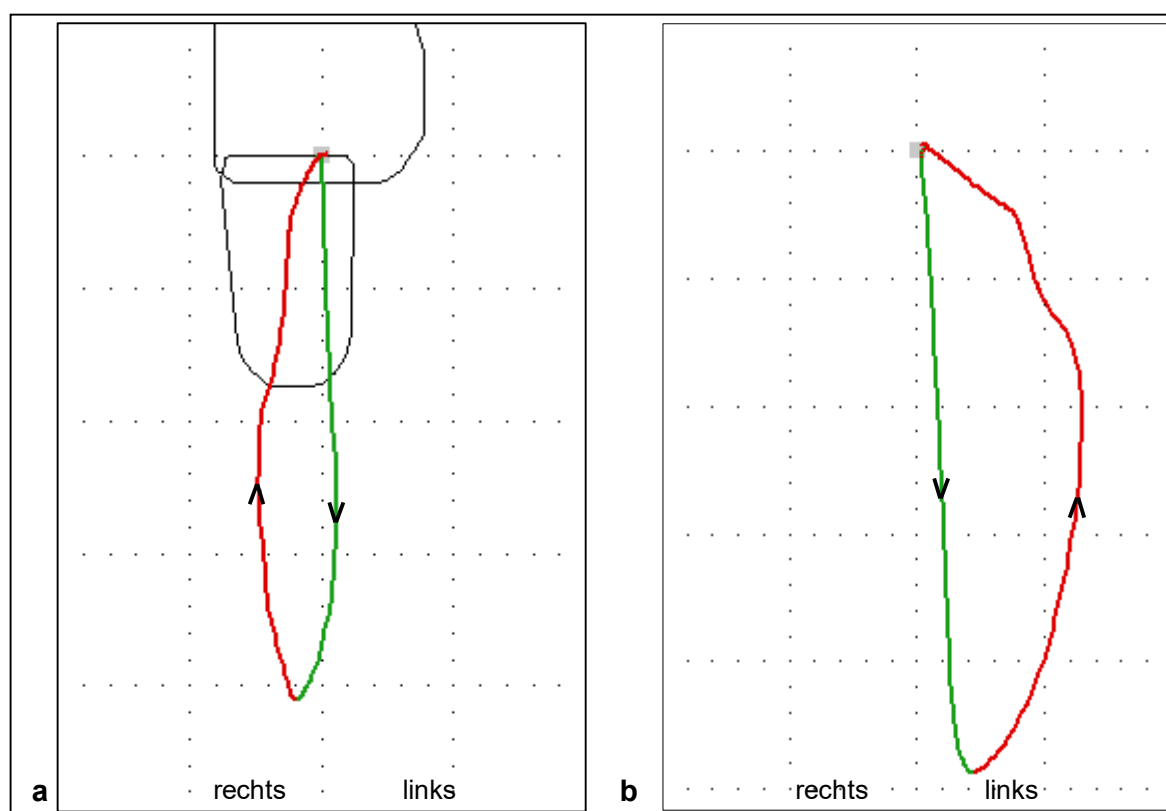
Bei FORDE et al.<sup>39</sup> wurden mit 86 Kauzyklen pro Minute Karotten schneller als die meisten anderen Lebensmittel gekaut. Vor allem weiche Nahrung wurde langsamer gekaut, die Mehrheit der verwendeten Testnahrungsmittel führte zu einer Kaufrequenz von einem Kauzyklus pro Sekunde. Während eines Durchganges mussten in den Versuchen von FORDE et al. jeweils 50 g eines Kaugutes verzehrt werden, die Bolusgröße wählten die Probanden dabei selbst. In der vorliegenden Arbeit wurden Karotten durchschnittlich etwas langsamer gekaut (76 Zyklen/Minute bzw. 1,26 Zyklen/Sekunde), womit diese Kaufrequenz stark der vieler anderer Lebensmittel ähnelt, die bei FORDE et al. untersucht wurden. Eine Erklärung für schnelleres Kauen ist Ablenkung beim Essen, da bei FORDE et al. vor dem Probanden in 30 cm Entfernung Kamera und Monitor positioniert wurden. Andererseits ist nicht vollständig ausgeschlossen, dass durch einen nicht vollständig abstellbaren „Versuchscharakter“ in der vorliegenden Studie Probanden mit einer niedrigeren Geschwindigkeit kauten. Noch wahrscheinlicher ist aber der Einfluss langsamer Sortier- und Reinigungszyklen am Ende jeder Sequenz, denn im Gegensatz zum Versuch von FORDE et al. war es das Ziel, nach jedem Durchgang die Kaugutpartikel vollständig geschluckt zu haben.



## 5.7 Richtungsverlauf des Kauzyklus und dessen Abhängigkeit von der Kaugutmenge

Im Kollektiv der vorliegenden Studie wurde weitaus häufiger im Uhrzeigersinn (vom Betrachter aus) gekaut als gegen den Uhrzeigersinn. Mit zunehmender Kaugutmenge verstärkte sich die Richtungspräferenz. Auffällig ist, dass die Richtung des ersten Kauzyklus einer Kausequenz größtenteils im Uhrzeigersinn verlief. Mit steigender Kaugutmenge war dabei eine Abnahme der Präferenz zu beobachten. Vermehrt wurden Startkauzyklen auch gegen den Uhrzeigersinn ausgeführt.

Es ist zu klären, ob von der ausgeführten Bewegungsrichtung auf die bevorzugte Kauseite geschlossen werden darf. Vielen visualisierten Kaumustern ist abzulesen, dass bei Kauzyklen im Uhrzeigersinn der Unterkiefer mit einer Lateralbewegung nach links geöffnet wird. Der Kieferschluss erfolgt mit einer Lateralbewegung nach rechts (Abb. 29 a).



**Abb. 29:** Kauzyklus in frontaler Betrachtung. Grün: Öffnungsbewegung, rot: Schließbewegung, schwarz: schematische Darstellung eines oberen und unteren Schneidezahnes. Die Seite des Kieferschlusses entspricht der Kauseite. a) Die Bewegung während dieses Kauzyklus erfolgt vom Betrachter im Uhrzeigersinn, b) die Bewegung erfolgt gegen den Uhrzeigersinn. Aus der Richtung des Kauens ist die Kauseite ableitbar, auch wenn wie bei b) der Kiefer während der Öffnungsbewegung nicht zur Balanceseite hin ausholt (Inzisalpunkt überschreitet nicht die Mittellinie).

Die Seite des Kieferschlusses entspricht der Kauseite, hier wird der Speisebolus platziert und zerquetscht. Sie ist im Falle von Kauen im Uhrzeigersinn auf der rechten Seite. Selbst wenn bei der Kieferöffnung kein Ausholen auf der Nicht-Kauseite stattfindet (Abb. 29 b), stimmt die Richtung mit der Kauseite überein (hier gegen den Uhrzeigersinn, Kauseite links). Demnach wurde in der vorliegenden Studie rechts häufiger gekaut als links. Im Seitenvergleich nahm rechtsseitiges Kauen mit zunehmender Kaugutmenge stärker zu.

Es werden unterschiedliche Methoden zur Bestimmung der bevorzugten Seite diskutiert. KAZAZOGLU et al.<sup>72</sup> sowie VARELA et al.<sup>184</sup> ermittelten nach 1, 3, 5 und 7 Kauzyklen die Lage des Kaugutes, CHRISTENSEN und RADUE<sup>24</sup> führten die visuelle Inspektion der Kaugutlage nach 10, 15 und 20 Sekunden durch. Andere Autoren erachten jene Seite, auf der das Kaugut während des ersten Kauzyklus zerquetscht wird, als die „bevorzugte Kauseite“<sup>60, 126</sup>. Neben der subjektiven Einschätzung der Probanden bezüglich ihrer bevorzugten Kauseite, wird die Aufzeichnung von Kauzyklen mithilfe elektronischer Registrarsysteme angewendet<sup>24, 184</sup>. Die Cineradiographie zur röntgenologischen Analyse der Lage eines mit Kontrastmittel versetzten Speisebolus wird aus ethischen Gründen mittlerweile nicht mehr angewendet. Die Ergebnisse der einzelnen Studien unterscheiden sich methodenabhängig.

Übereinstimmend mit VARELA et al.<sup>184</sup>, BLISSETT et al.<sup>13</sup>, ZAMANLU<sup>198</sup>, MARTINEZ-GOMIS<sup>107</sup> sowie NISSAN et al.<sup>126</sup> zeigen die vorliegenden Ergebnisse, dass bevorzugt auf der rechten Seite gekaut wird. BLISSETT et al.<sup>13</sup> betonen, dass bei kleineren Kaugutmengen einseitiges Kauen überwiegt, bei größeren Kaugutmengen wird zunehmend zwischen rechter und linker Kauseite abgewechselt, also beidseitig gekaut. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen eine Zunahme der Kauseitenpräferenz bei steigender Kaugutmenge. Weitere Studien unterschiedlicher Methodik sind abzuwarten, um die Angaben verifizieren zu können. Des Weiteren zeigen die Ergebnisse dieser Studie, dass die Bevorzugung der rechten Kauseite gemäß HOOHGMARTENS et al.<sup>60</sup> beim ersten Kauzyklus noch ausgeprägter ist, während das erste Prüfen der Speise stattfindet. Besonders bei kleineren Kaugutmengen findet die initiale Nahrungszerkleinerung bevorzugt zwischen den Zahnreihen der rechten Seite statt. Dies unterstützt die Annahme von VARELA et al.<sup>184</sup>, dass nicht nur der erste Kauzyklus betrachtet werden sollte, um die Kauseite zu ermitteln.

Als Grund für Kauseitenbevorzugung wird ein Zusammenhang mit der zentralen Steuerung im Gehirn und anderen Seitigkeiten wie Links-/Rechtshändigkeit diskutiert. Andererseits können auch periphere Faktoren wie Zahnlücken und unzureichende prothetische Versorgung dazu führen, dass aus der Bevorzugung einer Seite eine höhere Effizienz bei geringerem Energiebedarf resultiert und es langsamer zur Ermüdung kommt. Darüber hinaus kann auch Vermeidung aufgrund von Schmerzen zur Bevorzugung einer Seite führen<sup>24, 126, 165, 190</sup>. PAPHANGKORAKIT et al.<sup>136</sup> behaupten, dass das Auftreten beidseitigen Kauens oder einseitigen Kauens weniger von der Person als von der Art der Nahrung bestimmt wird. Auch verschiedene Arten von Kaugut verteilen sich unterschiedlich stark im Munde. Weiche, klebrige, zähe und durchspeichelungsintensive Nahrung (wie Kekse oder Zwieback) bildet eher einen zusammenhängenden Bolus, welcher vermehrt einseitig gekaut wird. Harte und spröde Nahrung (wie Nüsse und rohes Gemüse) hingegen verteilt sich stärker im gesamten Mundraum und wird somit vermehrt beidseitig gekaut. Des Weiteren ist ihrer Meinung nach die Bevorzugung der rechten oder linken Seite vielmehr zufällig und variiert bei ein und derselben Person. Zusätzlich hielten diese Autoren fest, dass beim Untersuchen der Kauseite spröde Lebensmittel die am besten reproduzierbaren Ergebnisse liefern. Karotten als Kaugut sind demnach sehr gut geeignet. Bei ihrer Zerkleinerung entstehen einzelne Partikel, welche nicht verklumpen, sodass kein einseitiges Kauen erzwungen wird.

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden die Probanden nach ihrer bevorzugten Kauseite und ihrer Händigkeit befragt. Das Phänomen der Händigkeit beschreibt, dass Primaten für feinmotorische Tätigkeiten beständig eine Hand bevorzugen, die so genannte dominante Hand. Auffällig ist die hohe Zahl von Rechtshändern. Für die europäische Bevölkerung wird sie mit 85-90% angegeben<sup>21</sup>. Basierend auf der Analyse archäologischer Funde, wie der Untersuchung von Werkzeugen auf Abnutzungsspuren, wird angenommen, dass schon die Neandertalerüberwiegend rechtshändig waren<sup>41</sup>. Da sich mehrheitliche Rechtshändigkeit in allen Zivilisationen feststellen lässt, werden biologische Gründe angenommen. Häufig wird Händigkeit in Familien weitergegeben, jedoch weist ein Viertel aller eineiigen Zwillinge unterschiedliche Händigkeiten auf. Daher geht man davon aus, dass die Vererbung nicht den mendelschen Gesetzen folgt<sup>170</sup>.

Forschung zur Lateralisation des Gehirns (die neuroanatomische Ungleichheit und funktionale Aufgabenteilung und Spezialisierung der Großhirnhemisphären) ergab, dass sowohl anatomische als auch funktionelle Asymmetrien zwischen den Hemisphären bestehen. Anatomische Asymmetrien sind in unterschiedlichen Regionen des Gehirns festzustellen, unter anderem ist in 70 % der Fälle die Sylvische Furche in der linken Hemisphäre ausgehnter, insbesondere bei Rechtshändern <sup>51</sup>. Aus funktioneller Sicht ist überwiegend die linke Hirnhälfte für die motorische Steuerung der rechten Körperseite zuständig, die rechte Hirnhälfte für die der linken Körperseite. Die Hirnhälfte, die vorrangig für die Verarbeitung von Sprache zuständig ist, wird als „dominante“ Hirnhälfte bezeichnet. Bei 95 % der Rechtshänder befindet sich diese links und auch bei der Mehrzahl der Linkshänder liegt das Sprachzentrum links, allerdings nur bei 70 %. Es gibt also eine gewisse Korrelation zwischen der „dominanten“ Gehirnhälfte und derjenigen Gehirnhälfte, die die starke Hand steuert <sup>50</sup>. Die Sprachdominanz der linken Hemisphäre ist nach der von ANNETT <sup>6</sup> entwickelten Right-Shift-Theorie auf ein einzelnes Gen zurückzuführen, dessen Einfluss eine entsprechende Entwicklung der rechten Gehirnhälfte hemmt und als Nebeneffekt eine benachteiligte motorische Geschicklichkeit der linken Hand nach sich zieht. Die hemisphärische Spezialisierung des Gehirns hat sich in der Evolution vermutlich durchgesetzt, weil dadurch die beiden Hirnhemisphären nicht in Konkurrenz zueinander treten konnten. Als Vorteil der Einhändigkeit gegenüber der Beidhändigkeit wird größere Präzision der Handarbeit durch spezifisches Training erachtet. Die Vorteile der mehrheitlichen Rechtshändigkeit sind unklar <sup>170</sup>.

Basierend auf den Forschungsergebnissen zur Lateralität des Gehirns, ist anzunehmen, dass genetisch ein Zusammenhang zwischen der Händigkeit und der Kauseite besteht. Möglicherweise sind gleiche Gene an ihrer Ausprägung beteiligt. Jedoch scheinen Händigkeit und Kauseite getrennt ausgeprägt zu werden, denn nicht alle Rechtshänder bevorzugen die rechte Seite beim Kauen. Hinzu kommt, dass die Händigkeit gesellschaftlich beeinflusst ist. Die rechte Hand wird hierzulande stark präferiert, nicht selten wurden in der Vergangenheit Linkshänder zu Rechtshändern umerzogen und Arbeitsplätze und -geräte, wie z.B. Scheren, sind vornehmlich für Rechtshänder ausgerichtet. Ob eine Kauseite stark bevorzugt wird, hängt wahrscheinlich in großem Maße auch von Prägung im Laufe des Lebens ab. Prägende Ereignisse können unter anderem asymmetrischer

Zahnwechsel im Kindesalter, Zahnverluste und Schmerzen in Muskulatur und Kiefergelenken sein.

Etwa die Hälfte der Probanden war der Meinung, eine Kauseite zu bevorzugen, bei der Mehrheit war dies Rechts. Mit einer Ausnahme bestand das Probandenkollektiv aus Rechtshändern. Die Ergebnisse decken sich weitgehend mit der im Versuch ermittelten Bevorzugung der rechten Seite.

Die Ermittlung der bevorzugten Kauseite kann im Rahmen der Funktionsdiagnostik wichtig sein, da sie sowohl Ursache als auch Symptom unterschiedlicher Befunde sein kann. FARIAS GOMES et al.<sup>36</sup> stellten fest, dass einseitig Kauende eine schlechtere Kaeffizienz aufweisen als beidseitig Kauende. DIERNBERGER et al.<sup>32</sup> evaluierten bei ihrer Studie mit 4086 Personen über einen Fragebogen und fanden heraus, dass einseitige Symptome temporomandibulärer Störungen, meist Schmerzen im Kiefergelenk und asymmetrischer Verlust von antagonistischem Kontakt, mit der Existenz einer bevorzugten Kauseite assoziiert waren. Trotz Ersatz verloren gegangener Zähne schienen nicht alle Restaurationen beidseitiges Kauen zu unterstützen. In einer Studie an Probanden mit temporomandibulären Funktionsstörungen von SANTANA-MORA et al.<sup>153</sup> war die habituelle Kauseite mit der Schmerzseite assoziiert. Sie vermuten, dass das Gelenk der Nichtarbeitsseite, welches sich mehr bewegt als das der Arbeitsseite, nicht so schnell Schaden nimmt, da der Gelenkknorpel über die Synovia besser versorgt wird. Eine bevorzugte Kauseite allein führt nicht zwangsläufig zu Symptomen einer kranio-mandibulären Dysfunktion. Sie empfehlen aber bei der Diagnose temporomandibuläre Funktionsstörung auch die habituelle Kauseite des Patienten zu bestimmen.

## 5.8 Kritische Betrachtung zur Methode und Ausblick

In der vorliegenden Studie wurde besonderer Wert darauf gelegt, dass ein natürlicher Kauvorgang durchgeführt wird. Die Probanden kauten natürliches Kaugut eine vollständige Kausequenz lang und durften Schlucken. Nur die Studien von LUCAS und LUKE<sup>98</sup>, LUCAS et al.<sup>99</sup> und FORDE et al.<sup>39</sup> wurden mit natürlichem Kaugut durchgeführt, davon durfte allein bei FORDE et al. geschluckt werden. Allerdings gaben sie ihren Probanden keine definierte Kaugutmenge pro Sequenz, sondern ließen 50 g jeden Kaugutes in belie-

bigen Portionsgrößen/Kaugutmengen verzehren. Sie stellten fest, dass sich die Kaugutmenge je nach Kaugut unterscheidet. Dabei bestand eine Abhängigkeit der Kauzyklenzahl von der Kaugutmenge. In ihrer Studie ging es um die orale Bearbeitung von Mahlzeiten, ihre Methode ist eingeschränkt reproduzierbar und eignet sich daher nicht als Kautest. Die Arbeit von BLISSETT et al.<sup>13</sup> entspricht der vorliegenden Studie hinsichtlich des Studiendesigns am besten. Das verwendete Kaugut (Weingummi) stellt allerdings ein künstliches Kaugut weicher Konsistenz dar. Somit sind alle diese Studien nur mit Einschränkungen für einen Vergleich der Kauzyklenzahlen bei unterschiedlichen Kaugutmengen geeignet.

Erschwerend bei Studien zum Thema sind die limitierten Aufzeichnungsmöglichkeiten. Jede bekannte Methode zur Registrierung der Kaubewegungen zwingt zu Kompromissen. Bei der Entscheidung für ein geeignetes Messsystem fiel die Wahl auf das K7-System der Fa. Myoronics (USA-Kent), denn es besticht durch seine einfache Handhabung und hohe Präzision, zudem bestätigten die Probanden seinen hohen Tragekomfort sowie geringe Beeinträchtigung des oralen Empfindens. Damit ist dieses Messsystem für die Analyse des Kauens das derzeit beste zur Verfügung stehende Instrument. Selten berichteten Probanden von stärkerem Wahrnehmen des Muskulus temporalis durch das am Kopf liegende Befestigungsband, leicht erschwertem Mundschluss aufgrund des Magneten oder der Furcht, der Magnet könnte sich lösen. Die Daten waren exakt genug, um das Studienziel zu erreichen. Völlige Interferenzfreiheit lässt sich allenfalls bei Videoaufnahmen erreichen, die präzise Erfassung der Kaubewegungen ist allerdings über Referenzpunkte auf der Haut nicht möglich. Abstriche in der Präzision und schlechtere Differenzierbarkeit einzelner Kauzyklen sowie das mögliche Gefühl beobachtet zu werden, sind Gründe, um von dieser Methodik Abstand zu nehmen. Bei Personen mit Restaurationen besteht die aufwendige Möglichkeit des Einbaus telemetrischer Sender in den Zahnersatz, bei natürlichen Gebissen ist dies jedoch nicht anwendbar. Homogenere Daten können erreicht werden, wenn nur bestimmte Kauzyklen analysiert werden. Dies wurde in der vorliegenden Arbeit nicht durchgeführt, um den natürlichen, individuellen Charakter des Kauens beizubehalten. Inwieweit das Selektieren von Kauzyklen die Ergebnisse verändert, wäre Inhalt möglicher weiterer Analysen.

Da ein Magnet an der Unterkieferfront befestigt werden muss, ist die verwendete Aufzeichnungsmethode limitiert. Probanden mit Tief- und Deckbiss kommen nicht für Studien mit dem K7-System in Betracht. Andererseits eignet sich das Registriersystem durch sein geringes Gewicht besonders für Unterkiefer-Hybridprothesen. Aufgrund der erhöhten Mobilität von partiellen Unterkieferprothesen ist ihr Halt bei vielen anderen Systemen nicht gewährleistet, das K7 übt hingegen keine Hebelkräfte auf die Prothese aus. Darüber hinaus können Prothesen auch eine etwas aufwendigere, dafür aber höchst komfortable und nahezu artefaktfreie Untersuchungsmöglichkeit bieten: Eine Einarbeitung des Magneten in den Frontzahnbereich einer unteren (Teil-) Prothese führt zu vom Messsystem vollkommen ungestörten Bewegungen. Der Magnet stellt auf diese Weise kein exponiertes Element mehr dar und ist weder als Fremdkörper noch als Hindernis spürbar. Laut Herstellerangaben führen Metallelemente zu keiner Verfälschung der Aufzeichnungen, sodass sogar die Verwendung von Modellgussprothesen bedenkenlos möglich ist.

Der in dieser Studie verwendete Versuchsaufbau ist für die Analyse des Kauens gut geeignet, gewisse Einschränkungen sind jedoch vorhanden. So wurde die Effektivität des Kauens nicht vollständig analysiert, da die finale Partikelgröße nicht direkt geprüft wurde. Grund ist der bewusste Verzicht auf das Ausspeien des zerkleinerten Kaugutes, um den Kauvorgang nicht zu verfälschen. Alle Aspekte in einem Versuch zu analysieren, ist derzeit nicht möglich. Interessant wäre sicher auch eine zusätzliche Analyse der Kaubewegungen im Verlauf eines Kauvorganges gewesen. Da bei der Analyse des Einflusses der Kaugutmenge auf das Kaumuster keine Trennung nach Männern und Frauen vorgenommen wurde, beantwortet die Studie nicht, ob in dieser Hinsicht Geschlechterunterschiede bestehen. Bei Betrachtung der Rohdaten waren keine Unterschiede offensichtlich. Um dies zu verifizieren, besteht jedoch die Möglichkeit, weitere Analysen durchzuführen. Die vorliegenden Ergebnisse gelten für das Kaugut Karotten im Mengenbereich von 2 g bis 8 g. Dies stellt eine Einschränkung für die Übertragbarkeit der Daten dar, denn für höhere und niedrigere Kaugutmengen sind somit nur Vermutungen zulässig. Andererseits entsprechen Kaugutmengen in diesem Bereich überwiegend der üblichen Bissengröße und das gewählte Kaugut stieß bei den Probanden auf breite Akzeptanz.

Die vorliegende Studie kann Grundlage für Folgestudien gleichen Designs sein. Der Vergleich der gewonnenen Daten mit Einzelpersonen ist aufgrund der Standardabweichung

wenig verlässlich und sollte in diesem Falle nur zum Beschreiben von Tendenzen herangezogen werden. Es bieten sich jedoch unter anderem Untersuchungen an Probandenkollektiven der teilbezahnten Population, Menschen mit kranio-mandibulären Dysfunktionen sowie Zahn- und Kieferfehlstellungen an. So kann auf Reduktionen der Kaueffizienz geprüft und die Notwendigkeit therapeutischer Intervention ermittelt werden. Möglicherweise wird eine Reduktion der Zerkleinerungseffizienz durch Anpassung der Kaustrategie ausgeglichen<sup>111</sup>. PEYRON et al.<sup>137</sup> sowie FELDMANN et al.<sup>37</sup> stellten fest, dass sich im Alter die geschluckte Partikelgröße nicht verändert, es werden jedoch mehr Kauzyklen benötigt, um das Kaugut schluckbereit zu zerkleinern. Mit steigender Zahl an fehlenden Zähnen hingegen stieg die finale Partikelgröße trotz steigender Zahl an Kauzyklen<sup>37, 185</sup>. Es gilt, auch andere Veränderungen im Mund-, Kiefer-, Gesichtsbereich hinsichtlich der Kaueffizienz zu kontrollieren und frühere Erkenntnisse mithilfe der modernen technischen Mittel zu überprüfen.

Sollte sich herausstellen, dass sich die Kauzyklenzahl bei Verdopplungen der Kaugutmenge im Bereich von 2 g bis 8 g bei Personen mit eingeschränkter Kaufunktion um einen anderen Faktor verändert als bei vollbezahnten, funktionsgesunden Personen, so könnte dieser Test mit Berechnung des Faktors zur Diagnostik von reduzierter Kaueffizienz angewendet werden. Der in dieser Studie beschriebene Test ist grundsätzlich auch ohne das Registriersystem K7 möglich. Es genügt das Zählen der Kauzyklen durch den Untersucher.

Eine Studie mit der gleichen Methodik wie in der vorliegenden Arbeit könnte mit Teilbezahnten durchgeführt werden. Da das Probandengut in dieser Arbeit zwischen 20 und 30 Jahren alt war, bietet sich eine Folgestudie mit teilbezahnten Personen entsprechenden Alters an. Weiterhin könnte Inhalt einer Untersuchung sein, ob sich Personen unterschiedlicher Altersgruppen bei gleichem Gebisszustand im Kauen unterscheiden.

GUNNE et al.<sup>48</sup> verglichen unterschiedliche Methoden zur Kaueffizienzbestimmung bei unterschiedlichem Zahnstatus und bemerkten, dass sich die Ergebnisse von Methode zu Methode unterschieden. Sie postulierten, dass mit jeder Methode ein bestimmter Aspekt des Kauens betrachtet werden kann, ein Vergleich von Ergebnissen methodisch unterschiedlicher Studien ist sehr eingeschränkt. Insgesamt können Kaueffizienztests, bei denen das Kaugut ausgespuckt werden soll, sobald es schluckbereit ist, zur Verfälschung der



Kausequenz führen. Der Proband oder Patient kontrolliert sein Kauen in verstärktem Maße und intermittierendes Schlucken während eines Zyklus wird unterdrückt. Ausspucken nach einer definierten Anzahl von Kauzyklen führt ebenfalls zu diesem Verhalten. Des Weiteren bleibt offen, ob der Proband seine Kauzyklenzahl während einer gewöhnlichen Mahlzeit seinem Gebisszustand anpasst.

Um die Aussagen zur Kaeffizienz präzisieren zu können, ist es möglich, den Test um einen Durchgang mit Ausspeien der Nahrung zu erweitern. Hierfür bietet sich eine mittlere Portionsgröße von 4 g an.

1. Durchgang: Kauen inklusive Schlucken des Speisebolus, dabei Ermittlung der Zahl an aufgewendeten Kauzyklen.
2. Durchgang: Der Proband wird aufgefordert, die Nahrung auszuspeien, sobald er ihren Zerkleinerungsgrad als schluckbereit empfindet. Die Zahl der aufgewendeten Kauzyklen wird notiert.

Sollten beide Kauzyklenzahlen annähernd übereinstimmen, bedeutet dies, dass beim untersuchten Probanden der Unterschied zwischen Kauvorgängen mit und ohne Ausspeien vernachlässigbar klein und die finale Partikelgröße gleich ist. Ihre Analyse hätte somit eine gute Aussagekraft.

Eine weitere mögliche Methode ist:

1. Durchgang: Kauen inklusive Schlucken des Speisebolus, dabei Ermittlung der Zahl an aufgewendeten Kauzyklen oder der Kaudauer.
2. Durchgang: Der Proband wird aufgefordert, die Nahrung mit gleicher Kauzyklenzahl (oder gleicher Kaudauer) wie in Durchgang 1 zu Kauen und anschließend auszuspeien.

Nachfolgend kann anhand der Partikelgröße die individuelle Kaeffizienz bewertet werden. Diese Vorgehensweise würde eine Kombination mit einem Test ähnlich der von WÖSTMANN et al.<sup>193</sup> und NGUYEN<sup>125</sup> bedeuten, welche die Zerkleinerungsleistung Anhand der Partikelgröße von Karotten nach einer Kaudauer von 45 Sekunden ermitteln. Nach Ausspeien der Partikel beurteilten sie den Zerkleinerungsgrad der Partikel visuell

und ordneten das Ergebnis in eine sechsstufige Bewertungsskala ein. Die vorliegende Studie ergab, dass Kaugutmengen von 4 g im Durchschnitt nach 28 Kauzyklen bzw. 22 Sekunden geschluckt werden. WÖSTMANN et al.<sup>193</sup> und NGUYEN<sup>125</sup> ließen allerdings ihre Probanden eine ähnliche Portionsgröße mit 45 Sekunden wesentlich länger kauen. Ein Kaeffizienztest kommt dem habituellen Kauen somit näher, wenn die Kauzyklenzahl auf etwa 30 bzw. die Kaudauer auf 20-25 Sekunden beschränkt wird.

Basierend auf den für diese Studie durchgeführten Vorversuchen wurde die gerätespezifische Software verbessert. Unter anderem ergänzten Programmierer der Fa. Myotronics-Noromed (Kent, WA) die Software um Module zur Erfassung von mastikatorischen Unterkiefer-Bewegungen. So erlaubt die handelsübliche Software nun die eindeutige Differenzierung jedes einzelnen Kauzyklus, das Registrieren der Bewegungsamplituden in allen drei Raumebenen, das Aufzeichnen der Geschwindigkeit und Dauer der Bewegungen, die Berechnung einer Hüllkurve zur Darstellung des Bewegungsfeldes sowie verbesserte Exportoptionen zum Transfer der Daten in das Microsoft Excel-Programm für die anschließende statistische Weiterverarbeitung. Beim Kauen von Karottenstücken größerer Menge (8 g und zum Teil auch schon bei 4 g) benötigten einige Probanden mehr als 50 Kauzyklen, bis die Partikel schluckbereit waren. Die K7-Software zeichnete allerdings nur maximal 50 Kauzyklen auf, einige Kausequenzen wurden daher unvollständig aufgenommen. Um die Ergebnisse nicht zu verfälschen, wurden diese aussortiert und flossen nicht in die Auswertung ein. So resultierten bei vereinzelt Analysen reduzierte Fallzahlen. Die Fa. Myotronics-Noromed wurde daraufhin angeregt, dieses Problem zu beheben. So ist es nun möglich, Kausequenzen mit bis zu 80 Kauzyklen ohne Datenverlust aufzuzeichnen.

## 6 Zusammenfassung

### **Zum Einfluss unterschiedlicher Volumina gleichen Kaugutes auf das Kaumuster vollbezahnter, junger Erwachsener**

SCHLÜSSELWÖRTER: Kaumuster, Kaubewegung, Kaufunktion, Kaeffizienz

Das Kauen ist ein komplexer, von zahlreichen Faktoren beeinflusster Vorgang. Neben den individuell variierenden anatomischen Gegebenheiten wie Morphologie der Kiefergelenke, Ausrichtung und Stärke der Kaumuskulatur, Anzahl und Stellung der Zähne sowie Ausformung der Schneide- und Kauflächen sowie Qualität und Quantität des Speichels, hängt das Kauverhalten auch von der Größe und der Konsistenz des Kaugutes ab.

Im Rahmen der vorliegenden Studie sollte geprüft werden, ob bei mund- und zahngesunden Personen eine charakteristische Abhängigkeit zwischen der Kaugutmenge definierter Konsistenz und Volumen, der maximalen Mundöffnung beim Kauen und der Anzahl der Kauzyklen von der Aufnahme bis zum reflektorischen Schlucken des Speisebolus besteht. Dazu wurden folgende Hypothesen aufgestellt:

- I. „Die Kaugutmenge beeinflusst nicht die Anzahl der Kauzyklen.“
- II. „Es besteht keine Abhängigkeit zwischen der Kaugutmenge und der vertikalen Amplitude der Unterkieferbewegung (maximale Mundöffnung).“

Zudem sollte untersucht werden, ob es einen Faktor gibt, um den sich die benötigte Anzahl von Kauzyklen bei steigendem Volumen gleichen Kaugutes verändert.

An der Studie nahmen 53 vollbezahnte und funktionsgesunde Probanden (16 Männer und 37 Frauen) im Alter von 20-30 Jahren teil. Für jeden Probanden wurde das Kaumuster und Kauverhalten beim Kauen von Karottenstücken unterschiedlicher Gewichte/Volumina (2 g/2,2 cm<sup>3</sup>, 4 g/4,4 cm<sup>3</sup> und 8 g/8,8 cm<sup>3</sup>) mithilfe eines Kinesiographen (K7, Fa. Myotronics-Noromed) aufgezeichnet. Zu jeder definierten Kaugutmenge wurden mit jedem Probanden drei Registrierdurchgänge durchgeführt. Die Messdaten wurden anschließend mit IBM SPSS Statistics 21 statistisch ausgewertet (ANOVA, Friedman- und Wilcoxon-Test).

Mit steigender Kaugutmenge nahm die Anzahl der Kauzyklen von der Aufnahme bis zum Schlucken des Speisebolus zu. Bei Verdopplung der Kaugutmenge von 2 g auf 4 g oder

von 4 g auf 8 g, stieg die Anzahl der Kauzyklen jeweils um etwa 50% (22 Kauzyklen bei 2 g, 28 bei 4 g, 38 bei 8 g). Die maximalen Bewegungsamplituden stiegen in allen drei Raumebenen: Die maximale Mundöffnung vergrößerte sich um durchschnittlich 1,6 mm (2 g auf 4 g) bzw. um 1,5 mm (4 g auf 8 g) signifikant (jeweils  $p < 0,001$ ).

Die Bewegungen des Inzisalpunktes in der Transversalen und Sagittalen veränderten sich trotz Variationen der Kaugutmenge nur geringfügig. So steigerte sich beim Öffnen die laterale Bewegung nach rechts um durchschnittlich 0,1 mm ( $p = 0,020$  bei 2g auf 4g),  $p = 0,001$  bei 4 g auf 8g) sowie beim Schließen um 0,2 mm ( $p = 0,047$  und  $p = 0,041$ ). Die laterale Bewegung nach links steigerte sich beim Öffnen um 0,2 mm (2 g auf 4 g,  $p = 0,006$ ) und 0,3 mm (4 g auf 8 g,  $p = 0,001$ ), beim Schließen um 0,3 mm (2 g auf 4 g,  $p = 0,001$ ) und 0,4 mm (4 g auf 8 g,  $p = 0,109$ ). Für die Veränderung der Bewegungsspuren nach anterior zeigte sich ebenfalls eine Abhängigkeit von der Kaugutmenge bei Verdopplung von 2 g auf 4 g ( $p = 0,011$ , Steigerung 0,06 mm), jedoch war kein signifikanter Unterschied belegbar zwischen 4 g und 8 g ( $p = 0,068$ , Steigerung 0,05 mm). In posteriorer Richtung nahm das Bewegungsausmaß bei Erhöhung der Kaugutmenge um 0,7 mm (2 g auf 4 g) und 0,8 mm (4 g auf 8 g) zu (jeweils  $p < 0,001$ ). Die durchschnittliche Kaugeschwindigkeit stieg negativ exponentiell ( $p < 0,001$ ; 144,8 mm/s bei 2 g, 154,1 mm/s bei 4 g und 163,6 mm/s bei 8 g). Die Dauer eines Kauzyklus blieb annähernd konstant (0,78 s bei 2 g, 0,79 s bei 4 g, 0,81 s bei 8 g), die Dauer einer gesamten Kausequenz nahm aufgrund der Erhöhung der Kauzyklenzahl zu (17,08 s, 22,21 s und 25,69 s).

Die Hypothese I muss verworfen werden, da sich bei Verdopplungen des Speisebolus im untersuchten Bereich von 2,2 - 8,8 cm<sup>3</sup> die Anzahl der Kauzyklen jeweils um einen Faktor von etwa 1,5 erhöhte. Somit nimmt die Zahl der Kauzyklen mit steigender Kaugutmenge zu, die Kauzyklenzahl pro Gramm jedoch nimmt ab. Kleinere Kaugutmengen werden vermutlich deshalb relativ gesehen länger gekaut, weil immer eine gewisse Zeit für die Durchspeichelung der Partikel erforderlich ist. Da bei der vorliegenden Studie methodenbedingt nicht der Zerkleinerungsgrad des zum Schlucken vorbereiteten Speisebolus bestimmt wurde, kann nicht beantwortet werden, ob Probanden, deren Kausequenzen deutlich weniger Kauzyklen als der Durchschnitt aufwiesen, effizienter kauten oder das Schlucken bei größerer Partikelgröße eingeleitet wurde. Auch die Hypothese II muss abgelehnt werden. Das Kaumuster änderte sich bei zunehmender Kaugutmenge durch Ansteigen der Zyklenzahl und Zunahme der Bewegungsamplituden, es blieb aber insgesamt charakteris-

tisch für den Probanden, indem die Form der einzelnen Kauzyklen annähernd gleich blieb. Mit zunehmendem Volumen des Kaugutes muss von Zunge, Lippen und Wangen ein größerer Aufwand betrieben werden, um den Speisebolus auf die Kauflächen zu befördern, während die Muskulatur versucht, den Unterkiefer über den Speisebolus bestmöglich auszubalancieren und den optimalen Kaukraftvektor für das Zerbeißen einzustellen. Hinsichtlich der Geschwindigkeit ist festzuhalten, dass sie bei Öffnungsbewegungen höher war, als Schließbewegungen. Erklärbar ist die niedrigere Geschwindigkeit beim Schließen damit, dass hier nicht nur eine freie Kieferbewegung, sondern zusätzlich das Zerquetschen der Nahrung mit einhergehender Abbremsung und sensomotorischer Feinregulierung stattfindet.

Zur Durchführung dieser Studie wurde im Vorfeld die gerätespezifische Software des K7-Systems für Kauversuche in enger Kooperation mit der IT-Abteilung der Fa. Myotronics-Noromed modifiziert und ergänzt. So erlaubt die handelsübliche Software nun auch die eindeutige Differenzierung jedes einzelnen Kauzyklus, das Registrieren der Bewegungsamplituden in allen drei Raumebenen, das Aufzeichnen der Geschwindigkeit und Dauer der Bewegungen, die Berechnung einer Hüllkurve zur Darstellung des Bewegungsfeldes sowie verbesserte Exportoptionen zum Transfer der Daten in das Microsoft Excel-Programm für die anschließende statistische Weiterverarbeitung.

## 6.1 Summary

### **Influence of varying bolus sizes on chewing pattern of subjects with full sets of teeth**

KEYWORDS: chewing pattern, chewing movement, chewing function

Mastication is a complex process and influenced by a number of variables. Besides individually varying anatomical conditions such as morphology of temporomandibular joints, orientation and strength of masticatory muscles, number and position of teeth as well as the shape of their cutting edges and occlusal surfaces, quality and quantity of saliva, chewing behavior depends on size and consistency of the food.

The primary objective of this study was to investigate the correlation between bolus size of a food with defined consistency and volume, maximum mouth opening and number of chewing cycles from ingestion to reflective swallowing in subjects without restrictions in oral health. It was hypothesized that:

- I. “Bolus size does not influence the number of chewing cycles.”
- II. “There is no correlation between bolus size and the vertical movement of the mandible (maximum mouth opening).”

Additionally a factor, to which the number of chewing cycles changes with increasing bolus size, should be evaluated.

Fifty-three young adults (37 women and 17 men) between 20 – 30 years of age without limitations in oral health participated in this study. Chewing pattern and chewing behavior of every subject was recorded by a kinesigraph (K7, Fa. Myotronics-Noromed) while chewing carrots of different weight and volume (2 g/2,2 cm<sup>3</sup>, 4 g/4,4 cm<sup>3</sup> und 8 g/8,8 cm<sup>3</sup>). Three recordings were made with each carrot size and subject. Obtained data was statistically analyzed by IBM SPSS Statistics 21 (ANOVA or Friedman- and Wilcoxon-Test).

With increasing bolus size, the number of chewing cycles from ingestion until swallowing of the bolus increased. By doubling the bolus size from 2 g to 4 g or from 4 g to 8 g, the number of chewing cycles rose by about 50% (22 cycles at 2 g, 28 at 4 g, 38 at 8 g). The maximal amplitudes of chewing movements increased in all three spatial axes: The maxi-

imum mouth opening increased by 1,6 mm (2 g to 4 g) and by 1,5 mm (4 g to 8 g) significantly ( $p < 0,001$  resp.).

Movements of incisal point in the transversal and sagittal plane vary with variations of bolus size just slightly. Thus, lateral movement to the right increased when opening by 0,1 mm for both, 2 g to 4 g ( $p = 0,020$ ) and 4 g to 8 g ( $p = 0,001$ ), when closing by 0,2 mm, respectively ( $p = 0,047$  and  $p = 0,041$ ). The lateral movement to the left increased when opening by 0,2 mm (2 g to 4 g,  $p = 0,006$ ) and 0,3 mm (4 g to 8 g,  $p = 0,001$ ), when closing by 0,3 mm (2 g to 4 g,  $p = 0,001$ ) and 0,4 mm (4 g to 8 g,  $p = 0,109$ ). As well for the variation of movement marks in anterior direction a dependence on bolus size by doubling from 2 g to 4 g ( $p = 0,011$ , increase 0,06 mm) was shown, however no significant difference was provable between 4 g and 8 g ( $p = 0,068$ , increase 0,05 mm). In posterior direction the movement amplitude increased by 0,7 mm (2 g to 4 g) and 0,8 mm (4 g to 8 g) ( $p < 0,001$  resp.). The mean chewing velocity increased negative exponentially ( $p < 0,001$ ; 144,8 mm/s at 2 g, 154,1 mm/s at 4 g and 163,6 mm/s at 8 g). The duration of the chewing cycle remained approximately constant (0,78 s at 2 g, 0,79 s at 4 g, 0,81 s at 8 g), the duration of an entire chewing sequence increased because of the risen number of chewing cycles (17,08 s, 22,21 s and 25,69 s).

The hypothesis must be rejected. When the bolus size is doubled in the examined range from 2,2 – 8,8 cm<sup>3</sup> the number of cycles increased by the factor of about 1,5. Thereby the average number of cycles of a chewing sequence increases with bolus size, however the number of cycles per gram decreases. It is supposed, that smaller bolus sizes are chewed more extensively, because a certain time is needed for moisturization. Due to the method used in this study, final particle size is not identified, so it can not be varified, if subjects, who had markedly less chewing cycles, chewed more efficient or swallowed lager particle sizes. This study shows that vertical and lateral movements rose with bolus size, so that even hypothesis II must be rejected. The chewing pattern changed as the number of chewing cycles and maximum movement amplitudes rose. However, each subject kept its characteristic chewing pattern, because the shape of a chewing cycle was unchanged. Simultaneously with increasing bolus size it is more difficult for tongue, lips and cheeks to place the food on the occlusal surfaces and to adjust the optimal vector of masticatory force for crunching. When chewing, musculature tries to adjust the lower jaw in the optimal position to the food bolus. With regard to the velocities of opening and closing movements it

was shown that opening velocity was higher. The lower velocity of the closing movements is caused by the “power stroke”. It includes the deceleration and sensomotoric adjustment in the end of the chewing cycle to mash the food.

For the realization of this study, the K7-software for chewing tests was modified and extended in cooperation with the IT-unit of Myotronics-Noromed. Hence, the commercial software allows the differentiation of every chewing cycle, registration of the amplitudes of chewing movements in all three spatial axes, the recording of velocity and duration of movements, calculation of movement-arrays for visualization as well as improved export-options to transfer data to Microsoft-Excel for subsequent statistical processing.



## 7 Literatur

1. Agerberg G. Maximal mandibular movements in young men and women. *Sven Tandlak Tidskr.* 1974;67:81-100.
2. Ahlgren. Masticatory movements in man. In: Anderson D, Matthews B, (Hrsg.). *Mastication*. Bristol: John Wright; 1976: S. 123.
3. Ahlgren J. Mechanism of mastication; a quantitative cinematographic and electromyographic study of masticatory movements in children, with special reference to occlusion of the teeth. *Acta odont scandinav.* 1966;44:1-109.
4. Akeel R, Nilner M, Nilner K. Masticatory efficiency in individuals with natural dentition. *Swed Dent J.* 1992;16:191-8.
5. Anderson K, Throckmorton GS, Buschang PH, Hayasaki H. The effects of bolus hardness on masticatory kinematics. *J Oral Rehabil.* 2002;29:689-96.
6. Annett M. Laterality and cerebral dominance. *J Child Psychol Psychiatry.* 1991;32:219-32.
7. Asakawa A, Fueki K, Ohyama T. Detection of improvement in the masticatory function from old to new removable partial dentures using mixing ability test. *J Oral Rehabil.* 2005;32:629-34.
8. Ash MM, Ramfjord S. *Occlusion*. Philadelphia: WB Saunders Company; 1995; 91ff.
9. Bailey RL, Ledikwe JH, Smiciklas-Wright H, Mitchell DC, Jensen GL. Persistent oral health problems associated with comorbidity and impaired diet quality in older adults. *J Am Diet Assoc.* 2004;104:1273-6.
10. Bakke M, Holm B, Jensen BL, Michler L, Moller E. Unilateral, isometric bite force in 8-68-year-old women and men related to occlusal factors. *Scand J Dent Res.* 1990;98:149-58.
11. Bates JF, Stafford GD, Harrison A. Masticatory function - a review of the literature. 1. The form of the masticatory cycle. *J Oral Rehabil.* 1975;2:281-301.
12. Bhatka R, Throckmorton GS, Wintergerst AM, Hutchins B, Buschang PH. Bolus size and unilateral chewing cycle kinematics. *Arch Oral Biol.* 2004;49:559-66.
13. Blissett A, Prinz JF, Wulfert F, Taylor AJ, Hort J. Effect of bolus size on chewing, swallowing, oral soft tissue and tongue movement. *J Oral Rehabil.* 2007;34:572-82.
14. Bosman F, van der Bilt A, van der Glas HW, Olthoff LW, Slagter AP. Chewing: a matter of selection and breakage. *Ned Tijdschr Tandheelkd.* 1993;100:16-9.

15. Braun S, Bantleon HP, Hnat WP, Freudenthaler JW, Marcotte MR, Johnson BE. A study of bite force, part 1: Relationship to various physical characteristics. *Angle Orthod.* 1995; 65: 367-72.
16. Brodeur JM, Laurin D, Vallee R, Lachapelle D. Nutrient intake and gastrointestinal disorders related to masticatory performance in the edentulous elderly. *J Prosthet Dent.* 1993; 70: 468-73.
17. Bumann A, Lotzmann U. Funktionsdiagnostik und Therapieprinzipien. Stuttgart: Thieme-Verlag; 2000; S. 45.
18. Buschang PH, Hayasaki H, Throckmorton GS. Quantification of human chewing-cycle kinematics. *Arch Oral Biol.* 2000; 45: 461-74.
19. Buschang PH, Throckmorton GS, Travers KH, Hayasaki H. Incisor and mandibular condylar movements of young adult females during maximum protrusion and lateratrusion of the jaw. *Arch Oral Biol.* 2001; 46: 39-48.
20. Carlsson GE. Bite force and chewing efficiency. *Front Oral Physiol.* 1974; 1: 265-92.
21. Cashmore L, Uomini N, Chapelain A. The evolution of handedness in humans and great apes: a review and current issues. *J Anthropol Sci.* 2008; 86: 7-35.
22. Cassady BA, Hollis JH, Fulford AD, Considine RV, Mattes RD. Mastication of almonds: effects of lipid bioaccessibility, appetite, and hormone response. *Am J Clin Nutr.* 2009; 89: 794-800.
23. Chauncey HH, Muench ME, Kapur KK, Wayler AH. The effect of the loss of teeth on diet and nutrition. *Int Dent J.* 1984; 34: 98-104.
24. Christensen LV, Radue JT. Lateral preference in mastication: a feasibility study. *J Oral Rehabil.* 1985; 12: 421-7.
25. Cousson PY, Bessadet M, Nicolas E, Veyrune JL, Lesourd B, Lassauzay C. Nutritional status, dietary intake and oral quality of life in elderly complete denture wearers. *Gerodontology.* 2012; 29: 685-92.
26. Daly RM, Elsner RJ, Allen PF, Burke FM. Associations between self-reported dental status and diet. *J Oral Rehabil.* 2003; 30: 964-70.
27. de Andrade FB, Caldas Junior AeF, Kitoko PM, Zandonade E. The relationship between nutrient intake, dental status and family cohesion among older Brazilians. *Cad Saude Publica.* 2011; 27: 113-22.
28. de Andrade FB, de França Caldas A, Kitoko PM. Relationship between oral health, nutrient intake and nutritional status in a sample of Brazilian elderly people. *Gerodontology.* 2009; 26: 40-5.

- 
29. De Marchi RJ, Hugo FN, Hilgert JB, Padilha DM. Association between oral health status and nutritional status in south Brazilian independent-living older people. *Nutrition*. 2008; 24: 546-53.
  30. Dellow PG, Lund JP. Evidence for central timing of rhythmical mastication. *J Physiol*. 1971; 215: 1-13.
  31. Diaz-Tay J, Jayasinghe N, Lucas PW, McCallum JC, Jones JT. Association between surface electromyography of human jaw-closing muscle and quantified food breakdown. *Arch Oral Biol*. 1991; 36: 893-8.
  32. Diernberger S, Bernhardt O, Schwahn C, Kordass B. Self-reported chewing side preference and its associations with occlusal, temporomandibular and prosthodontic factors: results from the population-based Study of Health in Pomerania (SHIP-0). *J Oral Rehabil*. 2008; 35: 613-20.
  33. Ellerbrock H. Vergleich von Führungswinkeln rein zahngeführter Grenzbewegungen mit Führungswinkeln des freien Kauens mit Hilfe des JMA-Systems. Dissertation, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf; 2009.
  34. Ervin RB. Healthy Eating Index scores among adults, 60 years of age and over, by sociodemographic and health characteristics: United States, 1999-2002. *Adv Data*. 2008; 20: 1-16.
  35. Faggion CM. The shortened dental arch revisited: from evidence to recommendations by the use of the GRADE approach. *J Oral Rehabil*. 2011; 38: 940-9.
  36. Farias Gomes SG, Custodio W, Moura Jufer JS, Del Bel Cury AA, Rodrigues Garcia RC. Correlation of mastication and masticatory movements and effect of chewing side preference. *Braz Dent J*. 2010; 21: 351-5.
  37. Feldman RS, Kapur KK, Alman JE, Chauncey HH. Aging and mastication: changes in performance and in the swallowing threshold with natural dentition. *J Am Geriatr Soc*. 1980; 28: 97-103.
  38. Fiegel A, Meullenet JF, Harrington RJ, Humble R, Seo HS. Background music genre can modulate flavor pleasantness and overall impression of food stimuli. *Appetite*. 2014; 76: 144-52.
  39. Forde CG, van Kuijk N, Thaler T, de Graaf C, Martin N. Oral processing characteristics of solid savoury meal components, and relationship with food composition, sensory attributes and expected satiation. *Appetite*. 2013; 60: 208-19.
  40. Foster KD, Woda A, Peyron MA. Effect of texture of plastic and elastic model foods on the parameters of mastication. *J Neurophysiol*. 2006; 95: 3469-79.
  41. Frayer DW, Lozano M, Bermúdez de Castro JM, Carbonell E, Arsuaga JL, Radovčić J, et al. More than 500,000 years of right-handedness in Europe. *Laterality*. 2012; 17: 51-69.

- 
42. Gerstner GE, Parekh VV. Evidence of sex-specific differences in masticatory jaw movement patterns. *J Dent Res*. 1997; 76: 796-806.
  43. Gibbs CH, Messerman T, Reswick JB, Derda HJ. Functional movements of the mandible. *J Prosthet Dent*. 1971; 26: 604-20.
  44. Gibbs CH, Wickwire NA, Jacobson AP, Lundeen HC, Mahan PE, Lupkiewicz SM. Comparison of typical chewing patterns in normal children and adults. *J Am Dent Assoc*. 1982; 105: 33-42.
  45. Gillings BR, Graham CH, Duckmanton NA. Jaw movements in young adult men during chewing. *J Prosthet Dent*. 1973; 29: 616-27.
  46. Gotfredsen K, Walls AW. What dentition assures oral function? *Clin Oral Implants Res*. 2007; 18: 34-45.
  47. Griffin CJ, Malor R. An analysis of mandibular movement. *Front Oral Physiol*. 1974; 1: 159-98.
  48. Gunne HS. Masticatory efficiency and dental state. A comparison between two methods. *Acta Odontol Scand*. 1985; 43: 139-46.
  49. Hagberg C. Assessment of bite force: a review. *J Craniomandib Disord*. 1987; 1: 162-9.
  50. Hanser H. Lexikon der Neurowissenschaft. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag. 2001, S. 114.
  51. Hartje W, Poek K. Klinische Neuropsychologie. Stuttgart: Thieme. 2000; S. 91.
  52. Hatch JP, Shinkai RS, Sakai S, Rugh JD, Paunovich ED. Determinants of masticatory performance in dentate adults. *Arch Oral Biol*. 2001; 46: 641-8.
  53. Heath MR. Dietary selection by elderly persons, related to dental state. *Br Dent J*. 1972; 132: 145-8.
  54. Heath MR. The effect of maximum biting force and bone loss upon masticatory function and dietary selection of the elderly. *Int Dent J*. 1982; 32: 345-56.
  55. Helkimo E, Carlsson GE, Helkimo M. Chewing efficiency and state of dentition. A methodologic study. *Acta Odontol Scand*. 1978; 36: 33-41.
  56. Hiiemae K, Heath MR, Heath G, Kazazoglu E, Murray J, Sapper D, et al. Natural bites, food consistency and feeding behaviour in man. *Arch Oral Biol*. 1996; 41: 175-89.
  57. Hiiemae KM. Masticatory movements in primitive mammals. In: Anderson DJ, Matthews B, (Hrsg.). Mastication. Bristol: John Wright; 1976; S. 105-17.

- 
58. Hiiemae KM. Mammalian mastication: A review of the activity of the jaw muscles and the movements they produce in chewing. In: Butler P, Joysey KA, (Hrsg.). Development, Function and Evolution of the Teeth. London: Springer. 1978; S. 359-98.
59. Hiiemae KM, Hayenga SM, Reese A. Patterns of tongue and jaw movement in a cinefluorographic study of feeding in the macaque. *Arch Oral Biol.* 1995; 40: 229-46.
60. Hoogmartens MJ, Cauberg MA, De Geest M. Occlusal, articular and temporomandibular joint dysfunction parameters versus chewing preference during the first chewing cycle. *Electromyogr Clin Neurophysiol.* 1987; 27: 7-11.
61. Howell PG, Ellis S, Johnson CW, Watson IB, Klineberg I. The recording and analysis of EMG and jaw tracking. II. Reproducibility of jaw tracking. *J Oral Rehabil.* 1993; 20: 33-43.
62. Howell PG, Johnson CW, Ellis S, Watson IB, Klineberg I. The recording and analysis of EMG and jaw tracking. I. The recording procedure. *J Oral Rehabil.* 1992; 19: 595-605.
63. Hugger A, Hugger S, Ahlers M, Schindler H, Türp J, Kordaß B. Die Bewegungsfunktion des Unterkiefers: Konzept zur Strukturierung von Analysekrterien und zur Standardisierung bei der computerunterstützten Aufzeichnung. *J Craniomand function.* 2013; 5: 41-53.
64. Hugger AW. Gelenknahe elektronische Erfassung der Unterkieferfunktion und ihre Umsetzung in den Artikulator. Berlin: Quintessenz-Verlag; 2000; S. 37.
65. Hugger AW. Gelenknahe elektronische Erfassung der Unterkieferfunktion und ihre Umsetzung in den Artikulator. Berlin: Quintessenz-Verlag; 2000; S. 13.
66. Jemt T. Changes in masticatory movement parameters within the chewing period in young dentate persons and patients rehabilitated with bridges supported by implants in the mandible. *J Oral Rehabil.* 1986; 13: 487-95.
67. Jemt T, Karlsson S. Computer-analysed movements in three dimensions recorded by light-emitting diodes. A study of methodological errors and of evaluation of chewing behaviour in a group of young adults. *J Oral Rehabil.* 1982; 9: 317-26.
68. Jemt T, Karlsson S, Hedegard B. Mandibular movements of young adults recorded by intraorally placed light-emitting diodes. *J Prosthet Dent.* 1979; 42: 669-73.
69. Julien KC, Buschang PH, Throckmorton GS, Dechow PC. Normal masticatory performance in young adults and children. *Arch Oral Biol.* 1996; 41: 69-75.
70. Kanno T, Carlsson GE. A review of the shortened dental arch concept focusing on the work by the Käyser/Nijmegen group. *J Oral Rehabil.* 2006; 33: 850-62.

- 
71. Karlsson S, Carlsson GE. Characteristics of mandibular masticatory movement in young and elderly dentate subjects. *J Dent Res*. 1990; 69: 473-6.
  72. Kazazoglu E, Heath MR, Müller F. A simple test for determination of the preferred chewing side. *J Oral Rehabil*. 1994; 21: 723.
  73. Khan S, Musekiwa A, Chikte UM, Omar R. Differences in functional outcomes for adult patients with prosthodontically-treated and -untreated shortened dental arches: a systematic review. *PLoS One*. 2014; 9: e101143.
  74. Kikutani T, Yoshida M, Enoki H, Yamashita Y, Akifusa S, Shimazaki Y, et al. Relationship between nutrition status and dental occlusion in community-dwelling frail elderly people. *Geriatr Gerontol Int*. 2013; 13: 50-4.
  75. King EE, Minz B, Unna KR. The effect of the brain stem reticular formation on the linguomandibular reflex. *J Comp Neurol*. 1955; 102: 565-96.
  76. Klett R. Die elektronische Kiefergelenkregistrierung. Neue Wege und Denkansätze in der instrumentellen Funktionsdiagnostik. *ZMK*. 2007; 23: 298-305.
  77. Kohyama K, Sasaki T, Hayakawa F. Characterization of food physical properties by the mastication parameters measured by electromyography of the jaw-closing muscles and mandibular kinematics in young adults. *Biosci Biotechnol Biochem*. 2008; 72: 1690-5.
  78. Kordaß B. Arbeitskreis Kaufunktion und orale Physiologie. 40 Jahre Kaumuster - eine Bestandsaufnahme. *Zahnärztl Mitt*. 2009; 99: 46-8.
  79. Körber E, Luckenbach A. Dreidimensionale Darstellung der Bewegung einzelner Punkte eines Kiefermodells im Artikulator. *DZZ*. 1981; 36: 462-6.
  80. Lassauzay C, Peyron MA, Albuissou E, Dransfield E, Woda A. Variability of the masticatory process during chewing of elastic model foods. *Eur J Oral Sci*. 2000; 108: 484-92.
  81. Lee JS, Weyant RJ, Corby P, Kritchevsky SB, Harris TB, Rooks R, et al. Edentulism and nutritional status in a biracial sample of well-functioning, community-dwelling elderly: the health, aging, and body composition study. *Am J Clin Nutr*. 2004; 79: 295-302.
  82. Lee RL. Jaw movements engraved in solid plastic for articulator controls. II. Transfer apparatus. *J Prosthet Dent*. 1969; 22: 513-27.
  83. Lehmann KM, Hellwig E, Wenz H-J. Zahnärztliche Propädeutik. 10. Auflage. Köln: Urban & Fischer; 2005; S. 6f.
  84. Lehmann KM, Hellwig E, Wenz H-J. Zahnärztliche Propädeutik. 10. Auflage. Köln: Urban & Fischer; 2005; S. 59-63.

- 
85. Lehmann KM, Hellwig E, Wenz H-J. Zahnärztliche Propädeutik. 10. Auflage. Köln: Urban & Fischer; 2005; S. 70ff.
  86. Lepley C, Throckmorton G, Parker S, Buschang PH. Masticatory performance and chewing cycle kinematics-are they related? *Angle Orthod.* 2010; 80: 295-301.
  87. Lepley CR, Throckmorton GS, Ceen RF, Buschang PH. Relative contributions of occlusion, maximum bite force, and chewing cycle kinematics to masticatory performance. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2011; 139: 606-13.
  88. Lewin A, Ramadori G. Electrognathographics. Chicago: Quintessence Pub. Co.; 1985; S. 82-5.
  89. Lewin A, van Rensburg LB, Lemmer J. A method of recording the movement of a point on the jaws. *J Dent Assoc S Afr.* 1974; 29: 395-7.
  90. Li GZ. A quantitative study of the ranges of mandibular movement in normal subjects with the digital sirognathograph. *Zhonghua Kou Qiang Yi Xue Za Zhi.* 1993; 28: 140-2.
  91. Orchardson R, Cadden SW. Mastication. In: Linden RWA, (Hrsg.). The scientific basis of eating: taste, smell, mastication, salivation and swallowing and their dysfunctions. London: Karger. 1998: S.76ff.
  92. Lopez-Jornet P, Saura-Perez M, Llevat-Espinosa N. Effect of oral health dental state and risk of malnutrition in elderly people. *Geriatr Gerontol Int.* 2013; 13: 43-9.
  93. Loret C, Walter M, Pineau N, Peyron MA, Hartmann C, Martin N. Physical and related sensory properties of a swallowable bolus. *Physiol Behav.* 2011; 104: 855-64.
  94. Lotzmann U. Zum Einfluß von Gewicht und schwerpunktlage des Unterkiefer-Registrierbogens auf den Verlauf axiographischer Spuren. *Dtsch Zahnärztl Z.* 1988; 43: 67-70.
  95. Lotzmann U. Die Prinzipien der Okklusion. 5. Auflage, München: Verlag Neuer Merkur. 1998; S. 53.
  96. Lotzmann U. Die Prinzipien der Okklusion. 5 Auflage, München: Verlag Neuer Merkur. 1998; S. 107.
  97. Lucas PW, Luke DA. Methods for analysing the breakdown of food in human mastication. *Arch Oral Biol.* 1983; 28: 813-9.
  98. Lucas PW, Luke DA. Optimum mouthful for food comminution in human mastication. *Arch Oral Biol.* 1984; 29: 205-10.

- 
99. Lucas PW, Ow RK, Ritchie GM, Chew CL, Keng SB. Relationship between jaw movement and food breakdown in human mastication. *J Dent Res.* 1986; 65: 400-4.
  100. Lund JP. Mastication and its control by the brain stem. *Crit Rev Oral Biol Med.* 1991; 2: 33-64.
  101. Lundeen HC, Gibbs CH. Advances in occlusion. Boston: John Wright; 1982; S. 18.
  102. Lundeen HC, Gibbs CH. Kieferbewegungen und ihre klinische Bedeutung. *Phillip J Restaur Zahnmed.* 1987; 4: 87-97.
  103. Mack H. Instrumentelle Voraussetzungen zur Erfassung des okklusoartikulären Systems. *Quintessenz Zahntechnik.* 1980; 6: 63-71.
  104. Mackenna BR, Turker KS. Jaw separation and maximum incising force. *J Prosthet Dent.* 1983; 49: 726-30.
  105. Mann T, Heuberger R, Wong H. The association between chewing and swallowing difficulties and nutritional status in older adults. *Aust Dent J.* 2013; 58: 200-6.
  106. Marcenes W, Steele JG, Sheiham A, Walls AW. The relationship between dental status, food selection, nutrient intake, nutritional status, and body mass index in older people. *Cad Saude Publica.* 2003; 19: 809-16.
  107. Martinez-Gomis J, Lujan-Climent M, Palau S, Bizar J, Salsench J, Peraire M. Relationship between chewing side preference and handedness and lateral asymmetry of peripheral factors. *Arch Oral Biol.* 2009; 54: 101-7.
  108. Mbodj EB, Ngom PI, Seck MT, Aidara AW, Ndiaye C, Dieng L, et al. Relationships between masticatory performance and nutritional state in complete denture wearers. *Odontostomatol Trop.* 2008; 31: 20-6.
  109. McKenna G, Allen PF, Flynn A, O'Mahony D, DaMata C, Cronin M, et al. Impact of tooth replacement strategies on the nutritional status of partially-dentate elders. *Gerodontology.* 2012; 29: 883-90.
  110. McKiernan F, Mattes RD. Effects of Peanut Processing on Masticatory Performance during Variable Appetitive States. *J Nutr Metab.* 2010; 2010: 487301.
  111. Mishellany A, Woda A, Labas R, Peyron MA. The challenge of mastication: preparing a bolus suitable for deglutition. *Dysphagia.* 2006; 21: 87-94.
  112. Miura H, Kariyasu M, Yamasaki K, Arai Y, Sumi Y. Relationship between general health status and the change in chewing ability: a longitudinal study of the frail elderly in Japan over a 3-year period. *Gerodontology.* 2005; 22: 200-5.
  113. Miura H, Watanabe S, Isogai E, Miura K. Comparison of maximum bite force and dentate status between healthy and frail elderly persons. *J Oral Rehabil.* 2001; 28: 592-5.



- 
114. Miyawaki S, Ohkochi N, Kawakami T, Sugimura M. Effect of food size on the movement of the mandibular first molars and condyles during deliberate unilateral mastication in humans. *J Dent Res.* 2000; 79: 1525-31.
  115. Mohl ND. Lehrbuch der Okklusion. Berlin, Chicago: Quintessenz; 1990; S. 101.
  116. Mojon P, Budtz-Jorgensen E, Rapin CH. Relationship between oral health and nutrition in very old people. *Age Ageing.* 1999; 28: 463-8.
  117. Mongini F, Tempia-Valenta G, Benvegna G. Computer-based assessment of habitual mastication. *J Prosthet Dent.* 1986; 55: 638-49.
  118. Mowlana F, Heath MR, Van der Bilt A, Van der Glas HW. Assessment of chewing efficiency: a comparison of particle size distribution determined using optical scanning and sieving of almonds. *J Oral Rehabil.* 1994; 21: 545-51.
  119. Moynihan PJ, Butler TJ, Thomason JM, Jepson NJ. Nutrient intake in partially dentate patients: the effect of prosthetic rehabilitation. *J Dent.* 2000; 28: 557-63.
  120. Myotronics-Noromed. 5870 S 194th Street Kent, WA 98032-2125, info@myotronics.com.
  121. Müller F, Nitschke I. Mundgesundheit, Zahnstatus und Ernährung im Alter. *Z Gerontol Geriatr.* 2005; 38: 334-41.
  122. Neill DJ, Howell PG. Computerized kinesiography in the study of mastication in dentate subjects. *J Prosthet Dent.* 1986; 55: 629-38.
  123. Neyraud E, Peyron MA, Vieira C, Dransfield E. Influence of bitter taste on mastication pattern. *J Dent Res.* 2005; 84: 250-4.
  124. Nguyen CT. Auswirkungen der Qualität des Zahnersatzes und der Kaueffizienz auf den Ernährungszustand geriatrischer Patienten und die Entwicklung eines Kaufunktionstestes. Dissertation, Justus-Liebig-Universität Gießen; 2001.
  125. Nguyen CT, Wöstmann B, Ferger P, Kolb G. Auswirkungen der Qualität des Zahnersatzes und der Kaueffizienz auf den Ernährungszustand geriatrischer Patienten. *Euro J Ger.* 1999; 1: 84.
  126. Nissan J, Gross MD, Shifman A, Tzadok L, Assif D. Chewing side preference as a type of hemispheric laterality. *J Oral Rehabil.* 2004; 31: 412-6.
  127. Nowjack-Raymer RE, Sheiham A. Association of edentulism and diet and nutrition in US adults. *J Dent Res.* 2003; 82: 123-6.
  128. Nowjack-Raymer RE, Sheiham A. Numbers of natural teeth, diet, and nutritional status in US adults. *J Dent Res.* 2007; 86: 1171-5.

- 
129. Ogawa T, Ogawa M, Koyano K. Different responses of masticatory movements after alteration of occlusal guidance related to individual movement pattern. *J Oral Rehabil.* 2001; 28: 830-41.
  130. Okeson JP. Management of temporomandibular disorders and occlusion. 6. Auflage. St. Louis, Mo: Elsevier/Mosby; 2008; S. 123.
  131. Omar SM, McEwen JD, Ogston SA. A test for occlusal function. The value of a masticatory efficiency test in the assessment of occlusal function. *Br J Orthod.* 1987; 14: 85-90.
  132. Osterberg T, Tsuga K, Rothenberg E, Carlsson GE, Steen B. Masticatory ability in 80-year-old subjects and its relation to intake of energy, nutrients and food items. *Gerodontology.* 2002; 19: 95-101.
  133. Ow RK, Carlsson GE, Karlsson S. Relationship of masticatory mandibular movements to masticatory performance of dentate adults: a method study. *J Oral Rehabil.* 1998; 25: 821-9.
  134. Pameijer JH, Glickman I, Roeber FW. Intraoral occlusal telemetry. 3. Tooth contacts in chewing, swallowing and bruxism. *J Periodontol.* 1969; 40: 253-8.
  135. Papas AS, Palmer CA, Rounds MC, Russell RM. The effects of denture status on nutrition. *Spec Care Dentist.* 1998; 18: 17-25.
  136. Paphangkorakit J, Thothongkam N, Supanont N. Chewing-side determination of three food textures. *J Oral Rehabil.* 2006; 33: 2-7.
  137. Peyron MA, Blanc O, Lund JP, Woda A. Influence of age on adaptability of human mastication. *J Neurophysiol.* 2004; 92: 773-9.
  138. Peyron MA, Lassauzay C, Woda A. Effects of increased hardness on jaw movement and muscle activity during chewing of visco-elastic model foods. *Exp Brain Res.* 2002; 142: 41-51.
  139. Peyron MA, Maskawi K, Woda A, Tanguay R, Lund JP. Effects of food texture and sample thickness on mandibular movement and hardness assessment during biting in man. *J Dent Res.* 1997; 76: 789-95.
  140. Pond LH, Barghi N, Barnwell GM. Occlusion and chewing side preference. *J Prosthet Dent.* 1986; 55: 498-500.
  141. Postic SD, Krstic MS, Teodosijevic MV. A comparative study of the chewing cycles of dentate and denture-wearing subjects. *Int J Prosthodont.* 1992; 5: 244-56.
  142. Prakash N, Kalavathy N, Sridevi J, Premnath K. Nutritional status assessment in complete denture wearers. *Gerodontology.* 2012; 29: 224-30.

- 
143. Prinz JF. Quantitative evaluation of the effect of bolus size and number of chewing strokes on the intra-oral mixing of a two-colour chewing gum. *J Oral Rehabil.* 1999; 26: 243-7.
  144. Proschel P. An extensive classification of chewing patterns in the frontal plane. *Cranio.* 1987; 5: 55-63.
  145. Proschel P, Hofmann M. Problems in interpreting functional mandibular movements. I: The effects of multifactorial influences on the interpretability of recordings of masticatory movements. *Dtsch Zahnärztl Z.* 1987; 42: 696-700.
  146. Proschel P, Hofmann M. Frontal chewing patterns of the incisor point and their dependence on resistance of food and type of occlusion. *J Prosthet Dent.* 1988; 59: 617-24.
  147. Proschel P, Hofmann M, Ott R. Ortho-function of the masticatory system. *Dtsch Zahnärztl Z.* 1985; 40: 186-91.
  148. Proschel P, Hrezkuw S, Hofmann M. Problems in interpreting functional mandibular movements. 2. Results of natural variations of mastication on the interpretation of test results. *Dtsch Zahnärztl Z.* 1988; 43: 777-83.
  149. Reissmann DR, Heydecke G, Schierz O, Marré B, Wolfart S, Strub JR, et al. The randomized shortened dental arch study: temporomandibular disorder pain. *Clin Oral Investig.* 2014; 18: 22159-69.
  150. Rugh JD, Smith BR. Mastikation. In: Mohl ND, (Hrsg.). Lehrbuch der Okklusion. Berlin, Chicago: Quintessenz; 1990; S. 163.
  151. Sahyoun NR, Lin CL, Krall E. Nutritional status of the older adult is associated with dentition status. *J Am Diet Assoc.* 2003; 103: 61-6.
  152. SAM. Präzisionstechnik GmbH, [http://www.sam-dental.de/files/pdf/SAM/Katalog\\_deutsch\\_Ebook.pdf](http://www.sam-dental.de/files/pdf/SAM/Katalog_deutsch_Ebook.pdf), abgerufen am 22. April 2013.
  153. Santana-Mora U, López-Cedrún J, Mora MJ, Otero XL, Santana-Penín U. Temporomandibular disorders: the habitual chewing side syndrome. *PLoS One.* 2013; 8: e59980.
  154. Savoca MR, Arcury TA, Leng X, Chen H, Bell RA, Anderson AM, et al. Severe tooth loss in older adults as a key indicator of compromised dietary quality. *Public Health Nutr.* 2010; 13: 466-74.
  155. Schimmel M, Christou P, Herrmann F, Müller F. A two-colour chewing gum test for masticatory efficiency: development of different assessment methods. *J Oral Rehabil.* 2007; 34: 671-8.
  156. Schindler HJ, Stengel E, Spieß WEL. Elektromyographische Aktivität, Kraftentwicklung und Kinematik beim Kauen fester Nahrungstexturen. *Dtsch Zahnärztl Z.* 1998; 53: 551-6.

- 
157. Schumacher G-H. Makromorphologie der menschlichen Zähne. In: Alt KW, Türp JC, (Hrsg). Die Evolution der Zähne Phylogenie-Ontogenie-Variation. Berlin: Quintessenz; 1997; S. 471-501.
  158. Schumacher GH. Anatomie für Stomatologen: Kopf-Orofaziales System-Auge-Ohr. Leipzig: J.A. Barth; 1984; S. 296.
  159. Schönwälder G. Die Weiterentwicklung des Messsystems Sirognathograph und deren klinische Erprobung unter besonderer Berücksichtigung klinischer und technischer Störgrößen. Dissertation, Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifwald; 2002.
  160. Seboleva U, Laurina L, Slaidina A. The masticatory system - an overview. *Stomatologija*. 2005; 7: 77-80.
  161. Sheiham A, Steele JG, Marcenes W, Lowe C, Finch S, Bates CJ, et al. The relationship among dental status, nutrient intake, and nutritional status in older people. *J Dent Res*. 2001; 80: 408-13.
  162. Sherrington CS. Reflexes elicitable in the cat from pinna vibrissae and jaws. *J Physiol*. 1917; 51: 404-31.
  163. Shiau YY, Chang HF, Chang YC. Observation of bolus position with standardized test foods and fluoroscopic technique. *J Oral Rehabil*. 1996; 23: 607-14.
  164. Shiga H, Stohler CS, Kobayashi Y. The effect of bolus size on the chewing cycle in humans. *Odontology*. 2001; 89: 49-53.
  165. Shinagawa H, Ono T, Ishiwata Y, Honda E, Sasaki T, Taira M, et al. Hemispheric dominance of tongue control depends on the chewing-side preference. *J Dent Res*. 2003; 82: 278-83.
  166. Slagter AP, Bosman F, Van der Bilt A. Comminution of two artificial test foods by dentate and edentulous subjects. *J Oral Rehabil*. 1993; 20: 159-76.
  167. Slagter AP, van der Glas HW, Bosman F, Olthoff LW. Force-deformation properties of artificial and natural foods for testing chewing efficiency. *J Prosthet Dent*. 1992; 68: 790-9.
  168. Soliman N, el-Batran M, el-Nofely A. Oral health and nutritional status in Egyptian elderly. *J Nutr Sci Vitaminol*. 1999; 45: 533-41.
  169. Srisilapanan P, Malikaew P, Sheiham A. Number of teeth and nutritional status in Thai older people. *Community Dent Health*. 2002; 19: 230-6.
  170. Stein JF, Stoodley CJ. Neuroscience. An Introduction. Chichester: John Wiley & Sons, 2006; S. 428ff.
  171. Stohler CS. A comparative electromyographic and kinesigraphic study of deliberate and habitual mastication in man. *Arch Oral Biol*. 1986; 31: 669-78.

- 
172. Stroebele N, de Castro JM. Listening to music while eating is related to increases in people's food intake and meal duration. *Appetite*. 2006; 47: 285-9.
  173. Stuart CE, Stallard H. Principles involved in restoring occlusion in natural teeth. *J Prosthet Dent*. 1960; 10: 304-13.
  174. Takada K, Miyawaki S, Tatsuta M. The effects of food consistency on jaw movement and posterior temporalis and inferior orbicularis oris muscle activities during chewing in children. *Arch Oral Biol*. 1994; 39: 793-805.
  175. Tanasić I, Tihacek-Šojić L, Milić-Lemić A. Biomechanical behavior of restored and unrestored mandible with shortened dental arch under vertical loading condition. *Acta Bioeng Biomech*. 2012; 14: 31-6.
  176. Tatematsu M, Mori T, Kawaguchi T, Takeuchi K, Hattori M, Morita I, et al. Masticatory performance in 80-year-old individuals. *Gerodontology*. 2004; 21: 112-9.
  177. Thexton AJ. Mastication and swallowing: an overview. *Br Dent J*. 1992; 173: 197-206.
  178. Travers KH, Buschang PH, Hayasaki H, Throckmorton GS. Associations between incisor and mandibular condylar movements during maximum mouth opening in humans. *Arch Oral Biol*. 2000; 45: 267-75.
  179. Trepel M. Neuroanatomie. 5 Auflage. München: Urban & Fischer (Elsevier); 2012; S. 54-76.
  180. van der Bilt A, Engelen L, Pereira LJ, van der Glas HW, Abbink JH. Oral physiology and mastication. *Physiol Behav*. 2006; 89: 22-7.
  181. van der Bilt A, Olthoff LW, Bosman F, Oosterhaven SP. Chewing performance before and after rehabilitation of post-canine teeth in man. *J Dent Res*. 1994; 73: 1677-83.
  182. van der Bilt A, Pocztaruk RL, Frasca LC, van der Glas HW, Abbink JH. The influence of auditory and visual information on the neuromuscular control of chewing crispy food. *Eur J Oral Sci*. 2011; 119: 427-34.
  183. van der Bilt A, van der Glas HW, Olthoff LW, Bosman F. The effect of particle size reduction on the jaw gape in human mastication. *J Dent Res*. 1991; 70: 931-7.
  184. Varela JM, Castro NB, Biedma BM, Da Silva Dominguez JL, Quintanilla JS, Munoz FM, et al. A comparison of the methods used to determine chewing preference. *J Oral Rehabil*. 2003; 30: 990-4.
  185. Wayler AH, Chauncey HH. Impact of complete dentures and impaired natural dentition on masticatory performance and food choice in healthy aging men. *J Prosthet Dent*. 1983; 49: 427-33.

- 
186. Welsch U. Sobotta Lehrbuch Histologie. Zytologie, Histologie, Mikroskopische Anatomie. München: Elsevier; 2006; S. 356.
  187. Wickwire NA, Gibbs CH, Jacobson AP, Lundeen HC. Chewing patterns in normal children. *Angle Orthod*. 1981; 51: 48-60.
  188. Wilding RJ. The association between chewing efficiency and occlusal contact area in man. *Arch Oral Biol*. 1993; 38: 589-96.
  189. Wilding RJ, Lewin A. A computer analysis of normal human masticatory movements recorded with a sirognathograph. *Arch Oral Biol*. 1991; 36: 65-75.
  190. Wilding RJ, Lewin A. A model for optimum functional human jaw movements based on values associated with preferred chewing patterns. *Arch Oral Biol*. 1991; 36: 519-23.
  191. Wintergerst AM, Buschang PH, Throckmorton GS. Reducing within-subject variation in chewing cycle kinematics--a statistical approach. *Arch Oral Biol*. 2004; 49: 991-1000.
  192. Wintergerst AM, Throckmorton GS, Buschang PH. Effects of bolus size and hardness on within-subject variability of chewing cycle kinematics. *Arch Oral Biol*. 2008; 369-75.
  193. Wöstmann B, Wickop H, Kolb B, Ferger P. Zahnärztlich geriatrisches Assessment zur objektiven Einschätzung der zahnärztlich prothetischen Versorgung und des Ernährungszustandes älterer Patienten. *Geriatr Forsch*. 1997; 7: 112-3.
  194. Yamashita S, Hatch JP, Rugh JD. Does chewing performance depend upon a specific masticatory pattern? *J Oral Rehabil*. 1999; 26: 547-53.
  195. Yashiro K, Takada K. Model-based analysis of jaw-movement kinematics using jerk-optimal criterion: simulation of human chewing cycles. *J Electromyogr Kinesiol*. 2005; 15: 516-26.
  196. Youssef RE, Throckmorton GS, Ellis E, 3rd, Sinn DP. Comparison of habitual masticatory patterns in men and women using a custom computer program. *J Prosthet Dent*. 1997; 78: 179-86.
  197. Yurkstas AA. The masticatory act. A Review. *J Prosthet Dent*. 1965; 15: 248-62.
  198. Zamanlu M, Khamnei S, Salarilak S, Oskoe SS, Shakouri SK, Houshyar Y, et al. Chewing side preference in first and all mastication cycles for hard and soft morsels. *Int J Clin Exp Med*. 2012; 5: 326-31.
  199. zebris Medical GmbH, [http://www.zebris.de/deutsch/pdf/JMA-D\\_72.pdf](http://www.zebris.de/deutsch/pdf/JMA-D_72.pdf). abgerufen am 22. April 2013.

## **Anhang**

# **Studie zum Einfluss unterschiedlicher Volumina gleichen Kau- gutes auf das Kaumuster vollbezahnter, junger Erwachsener**

Leiter der Studie: Prof. Dr. Ulrich Lotzmann

Abteilung für Orofaziale Prothetik und Funktionslehre  
Georg-Voigt-Straße 3, 35039 Marburg  
Tel.: 06421-5863217

Sehr geehrte Probandin, sehr geehrter Proband,

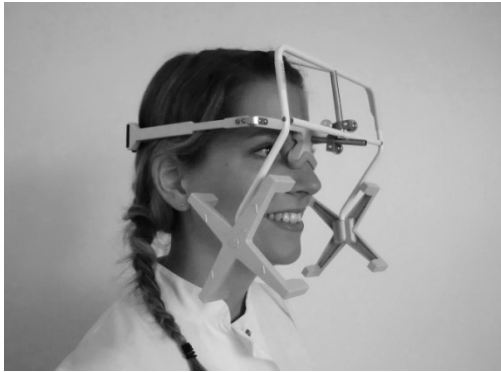
die Abteilung für Orofaziale Prothetik und Funktionslehre der Universitätszahnklinik Marburg bittet Sie um Ihre Teilnahme an der oben genannten Studie.

Im Rahmen dieser Studie soll untersucht werden, wie sich die Kaumuster von vollbezahnten Personen bei unterschiedlichen Kaugutmengen unterscheiden. Dazu werden die Kaumuster der Probanden während des Kauens von Karottenstücken einfacher-, doppelter- und dreifacher Menge digital aufgezeichnet und anschließend analysiert. Ein späterer Vergleich mit dem Kauverhalten von Patienten, deren Kaufunktion durch Kiefergelenksstörungen, Zahnlücken oder Zahnersatz beeinträchtigt ist, könnte dann dazu beitragen, die diagnostischen und therapeutischen Möglichkeiten für diese Patienten zu verbessern.

Vor Beginn der Kauversuche werden Ihre Zähne, Kiefergelenke und Kaumuskulatur auf ihren Gesundheitszustand hin untersucht. Für die Aufzeichnungen der Kaubewegungen wird Ihnen ein kleiner Magnet (15 x 7 x 2mm) an die Vorderflächen der unteren Schneidezähne mit einem geschmacksneutralen, leicht wieder entfernbaren Klebematerial fixiert. Der eigentliche Registrierbogen wird Ihnen ähnlich einer übergroßen Brille aufgesetzt, und mit einem elastischen Band um den Kopf befestigt. Dieser Bogen besitzt Magnetfeldsensoren, die Bewegungen des Magneten, und damit des Unterkiefers, beim Kauen registrieren. Dazu bekommen Sie nacheinander unterschiedliche Anzahlen von Karottenstückchen zu essen. Während des Kauens werden die Bewegungsbahnen des Unterkiefers aufgezeichnet und zeitgleich auf einem Bildschirm dargestellt.



Das Anbringen und Entfernen des Registriersystems, sowie die Versuchsdurchführung ist vollkommen schmerzlos und birgt keine Risiken- oder Nebenwirkungen.



Die Voruntersuchung sowie die Versuchsdurchführung dauern jeweils etwa 30 Minuten und werden nach Absprache mit Ihnen während des Semesters in den Räumen der Abteilung für Orofaziale Prothetik und Funktionslehre der Zahnklinik Marburg durchgeführt. Alle erhobenen Daten werden streng vertraulich behandelt und anonymisiert. Dies bedeutet, dass jedem Probanden ein Code zugeordnet wird, und die Daten ausschließlich in codierter Form verwendet werden. Die Liste zur Decodierung wird vom Projektleiter für andere unzugänglich aufbewahrt und nach Beendigung der Studie vernichtet. Die Speicherung der Daten erfolgt auf Datenträgern, die ausschließlich den Personen zugänglich sind, welche die Studie durchführen.

Die Teilnahme an dieser Studie ist freiwillig. Sie können jederzeit und ohne Angabe von Gründen Ihre Einwilligung widerrufen oder zurückziehen, ohne dass das Vertrauensverhältnis zu Ihrem behandelnden Arzt in irgendeiner Weise leidet oder dies nachteilige Folgen für Sie hat. Wir bedanken uns für Ihr Interesse.

# **Einwilligungserklärung**

## **Studie zum Einfluss unterschiedlicher Volumina gleichen Kau- gutes auf das Kaumuster vollbezahnter, junger Erwachsener**

Ich, \_\_\_\_\_, bin über Art, Durchführung und Gründe für die oben genannte Studie aufgeklärt worden und habe den Aufklärungstext gelesen und verstanden. Alle Fragen zur vorgesehenen Studie wurden von Prof. Dr. Lotzmann zu meiner Zufriedenheit beantwortet.

Ich hatte genügend Zeit für meine Entscheidung und bin bereit, an der oben genannten Studie teilzunehmen. Ich weiß, dass die Teilnahme an dieser Studie freiwillig ist. Ich bin mit der im Rahmen der Studie erfolgenden Aufzeichnung von Daten einverstanden.

Ich weiß, dass ich jederzeit und ohne Angaben von Gründen meine Einwilligung zur Teilnahme an dieser Studie widerrufen kann, ohne dass mir daraus Nachteile erwachsen.

Eine Kopie der Probandeninformation und dieser Einwilligungserklärung habe ich erhalten. Ich erkläre hiermit meine freiwillige Teilnahme an dieser Studie.

\_\_\_\_\_  
**Ort und Datum**

\_\_\_\_\_  
**Unterschrift des Probanden**

\_\_\_\_\_  
**Ort und Datum**

\_\_\_\_\_  
**Unterschrift des aufklärenden Zahnarztes**

## Untersuchungsbogen

### für die Studie „Zum Einfluss unterschiedlicher Volumina gleichen Kaugutes auf das Kaumuster vollbezahnter, junger Erwachsener“

Probandencode \_\_\_\_\_

Datum \_\_\_\_\_

Geburtsjahr \_\_\_\_\_

Geschlecht \_\_\_\_\_

ja nein

Sind Sie zurzeit in ärztlicher / zahnärztlicher Behandlung? \_\_\_\_\_ ☐ ja ☐ nein

Haben Sie Allergien? \_\_\_\_\_ ☐ ja ☐ nein

Wurde bei Ihnen eine KFO-Behandlung durchgeführt? \_\_\_\_\_ ☐ ja ☐ nein

Leiden Sie unter Beschwerden im Kopf-, Gesichts-, oder Nackenbereich? \_\_\_\_\_ ☐ ja ☐ nein

Pressen oder Knirschen Sie mit den Zähnen? \_\_\_\_\_ ☐ ja ☐ nein

Würden Sie Ihre Kauleistung als gut bezeichnen? \_\_\_\_\_ ☐ ja ☐ nein

Nehmen Sie beim Kauen Ohrgeräusche wahr? \_\_\_\_\_ ☐ ja ☐ nein

Wovon ernähren Sie sich bevorzugt? \_\_\_\_\_

Haben Sie eine bevorzugte Kauseite?      Nein ☐      rechts ☐      links ☐      weiß nicht ☐

#### Zähne

Rechtshänder ☐

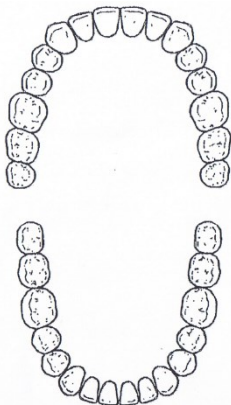
Linkshänder ☐

8	7	6	5	4	3	2	1	1	2	3	4	5	6	7	8
8	7	6	5	4	3	2	1	1	2	3	4	5	6	7	8

Alter des Zahnersatzes \_\_\_\_\_

ausgeprägte Abrasionen \_\_\_\_\_ ☐ ja ☐ nein

#### Okklusion



Verzahnung Klasse      I ☐      II/1 ☐      II/2 ☐      III ☐

ja nein

stabile maximale IKP? \_\_\_\_\_ ☐ ja ☐ nein

Front-/Eckzahnführung? \_\_\_\_\_ ☐ ja ☐ nein

Deckbiss \_\_\_\_\_ ☐ ja ☐ nein

Kopfbiss \_\_\_\_\_ ☐ ja ☐ nein

posteriorer Stützzonenverlust \_\_\_\_\_ ☐ ja ☐ nein

#### Funktion

	limitiert, hypermobil, Deflexion	Schmerzen	Gelenkgeräusche (objektiv/ Palpation)
Öffnen und Schließen			
Protrusion			
Retrusion			
Laterotrusion rechts			
Laterotrusion links			
Pressen in IKP (max. 20 Sek)			

## **Verzeichnis der akademischen Lehrer**

Meine akademischen Lehrer waren Damen/Herren in Marburg:

Arweiler, Chetin, Feuser, Frankenberger, Gente, Gloerfeld, Hilt, Höffken, Jablonski-Momeni, Korbmacher-Steiner, Lamp, Lill, Lotzmann, Mengel, Milani, Mittag, Moll, Neff, Neumüller, Nonnenmacher, Pieper, Ramaswamy, Roeßler, Roggendorf, Steininger, Stoll, Teymoortash, Weber, Westermann

## **Danksagung**

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. U. Lotzmann für die Überlassung des Dissertationsthemas und seine fachliche Betreuung.

Dank auch an Frau U. von Hehn von der Firma medistat GmbH für ihre statistische Beratung. Weiterhin möchte ich mich bei allen Probanden sowie Herrn H. Dörrzapf von der Firma SinfoMed GmbH bedanken.

Vielen Dank an alle, die bei Fragen immer ein offenes Ohr für mich hatten und diese Arbeit kritisch gelesen haben. Ganz besonders gilt hier mein Dank Lasse Rennebeck.